DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CEVHER HAZIRLAMA TESİSLERİNDE SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANIMI VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

Mesut GÖKKAYA

Eylül, 2016
İZMİR

CEVHER HAZIRLAMA TESİSLERİNDE SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANIMI VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı

Mesut GÖKKAYA

Eylül, 2016
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MESUT GÖKKAYA, tarafından **PROF. DR. MEHMET TANRIVERDİ** yönetiminde hazırlanan **"CEVHER HAZIRLAMA TESİSLERİNDE SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANIMI VE ÖRNEK BİR UYGULAMA"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Yönetici

Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK

(Jüri Üyesi)

Doç. Dr. Haluk GÜLİK

(Jüri Üyesi)

Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca hiçbir yardımını esirgemeyen ve yol gösteren kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemi asla unutmayacağım saygıdeğer Danışman Hocam Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ' ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince çalışmalarımda yardımcı olan Doç. Dr. Tayfun ÇİÇEK, Dr. Baran TUFAN, Araş. Gör. Çağrı ÇERİK ve Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi yönden bana destek hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan bana destek olan sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mesut GÖKKAYA

CEVHER HAZIRLAMA TESİSLERİNDE SİMÜLASYON PROGRAMI KULLANIMI VE ÖRNEK BİR UYGULAMA

ÖZ

Bilgisayarlı simülasyon tekniği her alanda olduğu gibi cevher hazırlamada da bir çok problemin daha hızlı ve kısa zamanda çözülmesini sağlamakta, deneysel çalışmaların getirdiği iş yükünü ve maliyeti azaltmaktadır. Cevher hazırlama tesis tasarımında planlama aşamasının süresini azaltmaktadır. Aynı zamanda simülasyon tekniği ile bir problemin çözümü için çok sayıda modeller geliştirilebilmekte ve bu modellerin getireceği sonuçlar değerlendirilerek en uygun olanı kolaylıkla seçilebilmektedir.

Bu çalışmada cevher hazırlama ve zenginleştirme tesislerinin bilgisayar destekli projelendirmesi için geliştirilmiş bilgisayar yazılımı olan JKSimMet v6.0.2 kullanılarak cevher hazırlama tesisi simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda cevher hazırlama tesisinde herhangi bir ekipman değişimi ve parametrelerde değişiklikler yapılması durumunda tesise ne gibi etkileri olduğu incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Simülasyon, cevher hazırlama, tesis dizaynı.

THE USE OF SIMULATION SOFTWARE IN MINERAL PROCESSING PLANT AND AN EXAMPLE APPLICATION

ABSTRACT

Computer simulation techniques in mineral processing provide solving problems faster in a short time and reduce costs that comes experimental work. And also, these techniques provide reducing time of ore beneficiation plant design. At the same time, a lot of model can be developed for solving the problems with simulation techniques and can be selected the most appropriate model evaluating results of simulation.

In this study, ore beneficiation plant design is carried out using JKSimMet v6.0.2 software that is designed for computer aided design of ore beneficiation and ore processing plants. Also, effects in plant are mentioned which in case of any equipment changes or parameters changes.

Keywords: Simulation, mineral processing, plant design.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ - CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TESİS TASARIMI 6

2.1 Tesis Tasarımı 6
2.2 Laboratuvar Çalışmaları 6
2.3 Akım Şeması Öğeleri ve Gösterimi 7
2.4 Fizibilite Çalışmaları 8
2.4.1 Ön Fizibilite Çalışmaları 8
2.4.2 Son Fizibilite Çalışmaları 8
2.5 Tesis Ekonomisi 9
2.5.1 Yatırım Değeri 9
2.6 Kırma ve Öğütme 9
2.7 Eleme ve Sınıflandırma 11
2.8 Zenginleştirme Birimlerinin Tasarımı 12
2.9 Katı-Sıvı Ayrımı Birimlerinin Tasarımı 14
2.9.1 Koyulaştırma (Thickening) 14
2.9.2 Filtrasyon 14

BÖLÜM ÜÇ - CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TESİS TASARIMI İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ SİMÜLASYON YAZILIMLARI 15

3.1 Bruno: Metso Kırma Tesisi Simülatörü 15
3.2 Plant Designer: Kırma ve Eleme Tesisi Modelleme Aracı 16
3.3 Usim Pac 3: Kırmadan - Arıtmaya Cevher Hazırlama Tesislerinin Tasarımı ve Optimizasyonu 17
3.4 METSIM 18
3.5 JKSimFloat 21
3.6 JKSimMet v6.0.1 22
3.6.1 JKSimMet Paket Programı İle Akım Şeması Oluşturma 24
3.6.2 Veri analizi 24
3.6.3 Model - Fitting (Modelleme) 25
3.6.4 Simülasyon 25
3.6.5 Raporlama 25
3.6.6 JKSimMet v 6.0.1. Nasıl Kullanılır? 26
3.6.7 JKSimMet v6.0.1 Paket Programı İle Akım Şeması Çizimi 28
3.6.8 Ekipmalar Arasındaki Bağlantılarının Yapılması 30
3.6.9 Sistem Özelliklerinin Belirlenmesi 31
3.6.10 Ekipman Verileri 33
3.6.11 Ekipman Modelinin Seçilmesi 35
3.6.12 Simülasyon 36
3.6.13 Simülasyon Menejeri 37
3.6.14 Bilgi Kutucuklarının Yerleştirilmesi 38

BÖLÜM DÖRT - ÖRNEK BİR CEVHER HAZIRLAMA TESİSİ SİMÜLASYONU 40

4.1 Numunelerin Temini 40
4.2 Simülasyon Çalışmaları 41
4.2.1 Görüntü Analizi Tekniği İle Tesise Beslenen Cevherin Kümülatif Elekaltı Eğrisinin Belirlenmesi 43
4.3 Farklı Model Hidrosiklonların Denenmesi 61
4.3.1 375 mm Çapında Hidrosiklon 62
4.3.2 450 mm Çapında Hidrosiklon 68

4.3.3 600 mm Çapında Hidrosiklon 74
4.4 Akım Şemasına İnce Kırma Devresi Eklenerek Öğütme Devresine Daha İnce Malzemenin Beslenmesi Durumu 78
4.4.1 Tesis Kapasitesinin 125 t/sa Olması Durumu 79
4.4.2 Tesis Kapasitesinin 135 t/sa Olması Durumu 80

BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER 82

KAYNAKLAR 84

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kırma tesisi akım şeması 10
Şekil 2.2 Belirli bir tane boyutunda ayırma için iki yöntem gösterilmiştir. (a) eleme, (b) gravite ve direnç kuvvetleri ile. 11
Şekil 3.1 JKSimMet paket programı açılış ekranı 26
Şekil 3.2 Yeni proje oluşturma iletişim penceresi 27
Şekil 3.3 JKSimMet paket programında simge stillerinin seçimi 27
Şekil 3.4 JKSimMet v6.0.1 paket programı 28
Şekil 3.5 Akım şemasına ekipmanların yerleştirilmesi 29
Şekil 3.6 Ekipman etiketlerinin oluşturulması 29
Şekil 3.6. Akım şemasında ekipmana bağlantı yapılması 30
Şekil 3.7 Bağlantıları tamamlanmış akım şeması 30
Şekil 3.8 Sistem özellikleri penceresi 31
Şekil 3.9 Elek serisi penceresinin açılması 32
Şekil 3.10. Elek serisinin belirlenmesi 33
Şekil 3.11. Akım veri penceresi 34
Şekil 3.12 Fraksiyon verileri sekmesi 34
Şekil 3.13 Ekipman penceresi 35
Şekil 3.14 Ekipman modelinin seçilmesi 35
Şekil 3.15 Seçilen ekipman çalışma parametrelerinin belirlenmesi 36
Şekil 3.16 Simülasyon penceresi 36
Şekil 3.17 Simülasyon menejeri penceresi 37
Şekil 3.18 Simülasyon parametresinin seçilmesi 37
Şekil 3.19 result stream sekmesi 38
Şekil 3.20 Bilgi kutucuklarının seçilmesi 38
Şekil 3.21 Akım şemasında bilgi kutucukları 39
Şekil 4.1 JKSimMet paket programı ile çizilen kırma-öğütme tesisi akım şeması ... 41
Şekil 4.2 Tesisin JKSimMet v6.02 paket programında akım şemasının çizilmesi 42
Şekil 4.3 Sistem özelliklerinin girilişi 43
Şekil 4.4 Sistem özelliklerinden çalışılan cevherin belirlenmesi 43
Şekil 4.5 WipFrag v 2.6 programına ölçeğin girilişi 44

Şekil 4.6 WipFrag v 2.6 programının taneleri belirlemesi 45
Şekil 4.7 WipFrag v 2.6 programın tanelerin boyutunu belirlemesi 45
Şekil 4.8 WipFrag v 2.6 programının verildiği elek altı eğrisi 46
Şekil 4.9 Çeneli kırıcı kapalı çıkış açıklığı değerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 48
Şekil 4.10 Çeneli kırıcı güç değerlerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 48
Şekil 4.11 Konik kırıcı kapalı konumdaki çıkış açıklığı değerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 49
Şekil 4.12 Konik kırıcı gücünün JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 49
Şekil 4.13 Tek katlı elek parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 50
Şekil 4.12 Çubuklu değirmen parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 51
Şekil 4.13 Bilyalı değirmen parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 51
Şekil 4.14 Hidrosiklon çalışma parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi 52
Şekil 4.15 Elek serilerinin JKSimMet v 6.0.1 paket programına girilişi 53
Şekil 4.16 Besleyici elek altı değerlerinin JKSimMet v 6.0.1 paket programına girilişi 53
Şekil 4.17 Tesisin akım şeması çizilerek simüle edilmiştir 54
Şekil 4.18 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu eleğe beslenen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 54
Şekil 4.19 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elek altına geçen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 55
Şekil 4.20 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elek üstü malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 56
Şekil 4.21 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu çubuklu değirmenden çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 56
Şekil 4.22 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu bilyalı değirmenden çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 57

Şekil 4.23 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklona beslenen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 58
Şekil 4.24 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 58
Şekil 4.25 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklon alt akımından çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi 59
Şekil 4.26 250 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 61
Şekil 4.27 Hidrosikolon çapının değiştirilmesi 62
Şekil 4.28 375 mm çaplı hidrosiklon hatası 62
Şekil 4.29 Hidrosiklon çapı 375 mm diğer çalışma parametreleri sabit bırakıldığında simülasyon sonucu akım şeması 63
Şekil 4.30 Hata veren 375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 65
Şekil 4.31 375 mm çapı olan hidrosiklon parametrelerinin değiştirilmesi 65
Şekil 4.32 6 adet 375 mm çaplı hidrosiklon kullanılması durumunda akım şeması .. 66
Şekil 4.33 375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 68
Şekil 4.34 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklon ile simülasyon .. 69
Şekil 4.35 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklon ile simüle edilmiş akım şeması 69
Şekil 4.36 Hata veren 450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 71
Şekil 4.37 450 mm çapında hidrosiklon parametrelerinin programa girilişi 71
Şekil 4.38 450 mm çapında hidrosiklonla simülasyon sonucu akım şeması 72
Şekil 4.33 450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 74
Şekil 4.34 600 mm çapında hidrosiklon parametrelerinin programa girilişi 74
Şekil 4.35 600 mm çapında hidrosiklon ile simülasyon sonucu akım şeması 75
Şekil 4.36 600 mm'lik hidrosiklonun tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi 77
Şekil 4.37 İnce kırma devresi içeren akım şeması 78
Şekil 4.38 Simüle edilmiş olarak ince kırma devresi içeren tesis 79
Şekil 4.39 125 t/sa kapasitede simüle edilen akım şeması 80
Şekil 4.40 135 t/sa kapasitede siülasyon sonucu akım şeması 80

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1 Alınan numunelerin tanımı 41
Tablo 4.2 Çeneli kırıcı ölçülen parametreler..... 42
Tablo 4.3 Tek katlı elek parametreleri. 42
Tablo 4.4 Konik kırıcı parametreleri..... 42
Tablo 4.5 Yığının görüntü analizi ile kümülatif elek altı değerleri ve ortalaması. 47
Tablo 4.6 Çubuklu değirmen çalışma parametreleri 50
Tablo 4.7. Bilyalı değirmen çalışma parametreleri. 51
Tablo 4.8 Hidrosiklon parametreleri. 52
Tablo 4.9 Simülasyon sonucu 250mm'lik hidrosiklon ürünleri fraksiyon yüzdeleri 60
Tablo 4.10 Simüle edilen hidrosiklonların çalışma parametreleri 62
Tablo 4.11 Diğer çalışma parametreleri sabit tutularak çapı 375 mm olarak ayarlanan hidrosiklon ürünleri kümülatif elek altı verileri. 64
Tablo 4.12 375 mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu elde edilen ait kümülatif elek altı verileri 67
Tablo 4.13 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklonun besleme malı, alt akım ve üst akım ürünlerine ait kümülatif elek altı verileri 70
Tablo 4.14 450 mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu besleme malı, alt ve üst çıkışa ait ürünlerin kümülatif elek altı verileri 73
Tablo 4.15 600mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu besleme malı, alt ve üst çıkışa ait ürünlerin kümülatif elek altı verileri 76
Tablo 4.16 Farklı modeldeki hidrosiklonların simülasyon sonuçları 77
Tablo 4.17 125 t/sa kapasitede hidrosiklon çalışma parametreleri 79
Tablo 4.18 600 mm'lik siklon için faklı kapasitelerin uygulnaması..... 81

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Son yıllarda cevher hazırlama tesislerinin işleyişi ve tasarımı için bir yöntem olarak literatürde bir çok bilgisayar simülasyon tekniği ortaya çıkmıştır. Simülasyon yöntemi araştırmalarda popüler bir konu ve uğraş haline gelmiş ve bu durum simülasyonu kalıcı ve pratik bir araç haline getirmiştir. Simülasyon aslında çalışmayan bir sistemi model olarak kullanabilecek herhangi bir yöntemdir. Bir simülasyonun elde edilebilmesi için çeşitli yollar vardır, ancak en etkili olanı bilgisayar destekli olanlarıdır. Var olan bir tesis bilgisayar tarafından karakterize edilerek programlandığı takdirde değişen koşullarda nasıl tepki verdiği ve performansı tahmin edilebilmektedir. Simülasyon tesiste uygulamaya gerek kalmadan birçok parametrede değerlendirme yapabildiği için çok kullanışlı bir yöntemdir.

Simülasyon, bir sistemin veya prosedürün davranışını anlamak ve çalışma şeklini kontrol etmek için stratejiler geliştirmek amacıyla bilgisayarlı modeller geliştirme sürecidir (Merks, 1990).

Bir cevher hazırlama tesisinin çalışma şartları belirlenirken simülasyon modelleri geliştirmek için akım şeması yazılımları kullanılabilir. Bununla birlikte iki ve üç bilinmeyenli denklemlerdeki her bir değişken için güvenilir bir tahmin gerekmektedir. Verimli ve mümkün olan en düşük maliyette değişkenlerin nasıl tahmin edildiği ve bir cevherin veya konsantrenin içerdiği metal miktarı gibi basit fonksiyonlar veya bir tesisin verimlilik yüzdesi gibi daha karmaşık fonksiyonlar kullanışlı bir simülasyon için anahtar kelimelerdir (Merks, 1990).

Sturgul ve Li (1997), madencilik endüstrisinde simülasyon tekniğinin sadece detaylı bir bakış açısı sağlamadığını, bunun yanında işletmelere hayati karalar almada yardımcı olduğunu vurgulamıştır. Lynch ve Morrison son yıllarda simülasyon modellerinde ekonomik faktörlerin öneminin arttığını söylemiştir. Bu programlarda maliyet hesaplarında ekipman, enerji, iş gücü, tedarikçiler ve ürünlerin satış şartları genel olarak simülasyon modellerinde yer almaktadır.

Karmaşık bir sistemin simülasyonu, ancak sistemdeki her bir bileşenin detaylı bir şekilde anlaşılmasıyla mümkün olmaktadır. Simülasyon kullanıcının mevcut olmayan bir sistemin davranışlarını tahmin etmesini sağlar. Ancak simülasyon tahminleri sistemdeki bileşenlerin ne kadar iyi anlaşıldığıyla alakalıdır. Bilgisayar iki nedenden dolayı simülasyonun temel parçasıdır: Cevher hazırlama mühendisliği ile ilgilenen birçok sistemde, matematiksel olarak ifade edilerek, yazılım koduna çevrilen her bir birim çok karmaşıktır; Bununla birlikte sistem her bir birimin birbiri ile olan karmaşık etkileşimlerini ve bağlantılarını ortaya çıkarmaya çalışır. Ne yazık ki bir çok çalışmada bu karmaşık etkileşimler yeterince açıklanamamaktadır, gerçek bir sistemde materyal veri veya enerji transferinin simüle edilmesinde sadece matematiksel metotlar ve yazılımlar kullanılır. Karmaşık bir sistemin formülasyonu, sistem matematiksel olarak lineer olduğu zaman etkili olmaktadır. Ne yazık ki bir çok sistem lineer değildir ve sistemin matematiksel olarak açıklanabilmesi için bilgisayar yazılımlarının deneme yanılma yeteneklerinin kullanılması gerekmektedir. Simülasyon cevher hazırlama tesisinde mühendise kırma / öğütme / taşıma işlerinde tesisin kapasitesini ve karını artıracak daha iyi operasyon şartlarını belirlemesini sağlar.

Bir endüstriyel tesis karmaşık bir yapıya ve çok sayıda değişik ekipmana sahip ise veya prosesler arası siloların kapasitesi sınırlı ise farklı proses birimlerinin birbiri ile ilişkisi iyi bir şekilde bilinmeyebilir. Bu durumda verimsizlik meydana gelebilir, tesis kapasitesinde dikkate değer bir düşüş meydana gelir. Böyle durumların üstesinden gelmek için yeni madencilik işlerinin planlamasında ve analizinde veya mevcut bir tesisin revizyonunda ve geliştirilmesinde, simülasyon bir teknik olarak giderek ilgi kazanmaktadır. Bir sistemin simülasyonu bilgisayar kullanarak bir modelin sayısal modeline karşılık gelir. Bu işlem bir sistemin mevcut şartlar altında ve ya farklı şartlar altında gözlemlenmesini ve performansının ölçülmesini mümkün kılar. Simülasyon programları sayesinde ön değerlendirmeler yapılarak, tesislerde kurulum esnasında meydana gelebilecek hata ve eksiklikleri, problemler önceden tahmin edilerek önlemler alınabilmektedir. Özellikle günümüz teknolojisinde çok kullanılmakta olan bilgisayar destekli projelendirme yöntemini esas aldığı için hızlı ve güvenilir çözümleri kısa sürede üretebilmekte ve cevher hazırlama sektörü için büyük bir yenilik ve avantaj sağlamaktadır (Asbjörnsson, 2013).

Wills (1986), karmaşık devrelerde matris ve istatistik yöntemleri kullanarak basit bağlantı hassasiyet analizini gerçekleştirmiştir. Bu yöntemle en iyi kütle balans modelini geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu yöntem akımlardan en az sayıda numune kullanmakta ve herhangi bir prosesin her bir akışındaki metal içeriği, katı oranı gibi sadece bir parametresini analiz etmeyi sağlamaktadır.

Kavramsal ifadelerin simülasyon modellerini oluşturup yatırım öncesi sistemin nasıl çalışacağı, nerelerde tıkanma olacağı gözlemlenebilir. Mevcut bir sistemin simülasyon modelini hazırlayarak bu sistemdeki tıkanma bölgelerini, bu sistemdeki problemli bölgeleri teşhis etme amacı ile simülasyon modelleri kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, simülasyon tekniğinin hiçbir zaman bir çözüm üretim yöntemi olmadığının bilinmesidir. Simülasyon modelleri üretildikten sonra, çözümlerinin de üretilmesi gerekmektedir. Yani, üretilen çözümlerin doğruluğu simülasyon modelleri üzerinde test edilmelidir (Simulation of ore dressing plants - the basic principles, 2004).

Üretim sisteminde, simülasyon tekniği kullanılarak yapılan çalışmaların maliyetinin daha düşük ve ucuz olması, simülasyon yöntemlerinin kullanılmasını teşvik etmektedir. İşletme bazında, gerçek durumda yapılan deneme çalışmalarının her açıdan maliyeti, simülasyon tekniğine göre çok daha yüksektir. Simülasyon, yapılacak değişikliklerle yatırım öncesinde tesisin çıktılarını ortaya koyacak; muhtemel sorunlara çözüm yollarının bulunmasını sağlayabilecektir (Gonzalez, Rayo ve Campos, 2001).

Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesislerinin tasarımda ilk aşama da kullanılacak akım şemalarının belirlenmesi önemli bir hususdur. Ancak akım şemaları belirlendikten sonra makine ve ekipmanların menşei (yerli veya ithal), modeli, kapasitesi ve güçleri gibi ihtiyaç duyulan özelliklerin belirlenmesi önem arz etmektedir (Merrit, 1984).

Genel olarak tesis tasarımı, yeni bir tesisin kurulması, var olan bir tesisteki yapılacak değişiklikler veya kapasite artırımı için gerekli olan tüm mühendislik

çalışmalarını ifade etmektedir. Teknik açıdan bakıldığında tesis tasarımı, tanımlanmış özellikteki ürün veya ürünleri üretmek için en uygun akım şemalarının çizilmesi, gerekli makine ve ekipmanların ve kapasitelerinin belirlenmesi ve akım şemasındaki kütle ve enerji balanslarının hesaplanması olarak düşünülebilir. Ancak tesis tasarımı endüstriyel bir uygulamayı amaçladığı için, tesis tasarımında tesis ekonomisi, yatırım ve işletme maliyetleri de önem arz etmektedir (Mular, Halbe ve Barratt, 2002).

Bu tez kapsamında cevher hazırlama tesislerinde bilgisayar destekli simülasyon tekniğinin uygulanması amacıyla geliştirilmiş JKSimMet paket programının kullanımı ve önemi irdelenmiştir. JKSimMet paket programı normal bir tesis tasarımında yapılması gereken deneysel iş gücünü azaltmaktadır. Ancak paket programın tesis simülasyonunu gerçekleştirebilmesi için bir dizi laboratuvar çalışması ile tesisin karakterize gerekmektedir. Laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler JKSimMet paket programına girilerek tesis modellenerek, simülasyon sonucu tesis verimi ile gerçek verim karşılaştırılması amaçlanmıştır. Hali hazırda işletilen cevher hazırlama tesisindeki problemlere çözüm üretecek yeni modeller geliştirilmiştir.

Madencilik sektöründe cevher hazırlama tesis kurulum ve işletme maliyetleri çok yüksektir. İşletmelerin bu sektörde faaliyet gösterebilmesi için iyi bir fizibilite ve projelendirme çalışması yapması gerekmektedir. Doğru makine ve ekipman seçimi, uygun iş gücünün tayini bu sürece dahildir. Cevher hazırlama tesislerinde tesisin gerçek kapasitedeki üretim miktarı tam olarak bilinememektedir. Bu nedenle birçok cevher hazırlama tesisi gerçek kapasitenin altında düşük verimle işletilmektedir (Yersel, 2012).

Tesis tasarımı ve optimizasyonu amaçlı simülasyon programları ile bir çok cevher hazırlama ve zenginleştirme akım şemalarının etkin çizilmesi, çalışmalara büyük bir hız kazandırmıştır. Ancak hala simülasyon paket programlarının flotasyon, ayırma ve kuru öğütme gibi devrelerde eksiklikleri ve yetersizlikleri bulunmaktadır. Bu eksiklik ve yetersizlikler, kullanıcıların istekleri doğrultusunda yazılım uzmanları tarafından iyileştirme yapılarak güncellenmekte ve daha kullanışlı hale getirilmeye çalışılmaktadır. Ancak en gelişmiş bir simülasyon programı bile yalnız başına basit bir

cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisi planlamasını yapamamaktadır. Bir tesisin başarılı bir şekilde tasarımı sonrasında üretime geçilebilmesi için simülasyon tekniğinin ne zaman ve nerde kullanılacağının bilinmesi temel unsurdur (Wills, 2006).

Simülasyon parametrelerinin belirlenmesi için cevher hazırlama tesisi ile ilgili temel varsayımlar oluşturulmalıdır. Tesis ekipmanın durum, tesise beslenen cevherin yaş veya kuru olması, cevherin tenörü, sertliği, kırılganlığı gibi parametreler dikkatle belirlenmelidir.

BÖLÜM İKİ
CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TESİS TASARIMI

2.1 Tesis Tasarımı

Madencilik sektöründe üreticiler tarafından öne sürülen birçok ekipman tasarımı yer almaktadır. Yatırımcıların cevher hazırlama zenginleştirme işlemleri için en ekonomik çözümü üretmesi gerekmektedir. Ancak en ekonomik tasarımın geliştirilmesi, cevher hazırlama tesis tasarım mühendisleri ve makine ekipman üreticilerin birlikte çalışmasını gerektirir. Tesis tasarım mühendislerinin tesis kurulumu için gerekli parametreleri doğru bir şekilde makine üreticilerine aktarması, üreticilerinde zenginleştirme ekipmanının yeterlilikleri tasarım mühendislerine bildirmesi gerekir. Cevherin karakteristiği ve zenginleştirme cihazları üzerindeki etkisi tasarım mühendisleri tarafından bilinmesi tasarım sürecini daha kolay hale getirir (Muller, Hubbel ve Barrat, 2002).

2.2 Laboratuvar Çalışmaları

Tesis tasarımı amacıyla yapılan bütün testler tesise beslenecek katı veya sıvı malzemeden temsili olarak alınmış numuneler ile gerçekleştirilmelidir. Deneylerde kullanılan numunenin temsili olmaması deney sonuçlarının uygulanabilir olmasını ortadan kaldırır. Beher, mezür, tüp içerisinde ve laboratuvar ölçekli flotasyon ve otoklavda gerçekleştirilen deneyler laboratuvar deneyleri olarak adlandırılır ve temel prensipler hakkında güvenilir bilgi üretmeyi amaçlanır. Kimyasal ve fiziksel olarak doğru anlaşılmış hale gelindiği ve ön ekonomik analizi doğrulandığı ve daha kapsamlı bir değerlendirmeyi gerekli kıldığı takdirde pilot ölçekli bir çalışma yapılabilir (King, 2001) . Laboratuvar çalışmaları, pilot ölçekte tasarlanabilecek devrelerin materyal balansı için hazırlık yapılabilecek kadar kapsamlı olmalıdır.

2.3 Akım Şeması Öğeleri ve Gösterimi

Süreç akım şemaları bir tesiste kullanılan işlemlerin sıralarının ve malzeme akışının görsel olarak anlaşılmasına yardımcı olan çizimlerdir. Cevher hazırlama ve zenginleştirme akım şemaları genelde aşağıda verilen bir dizi temel işlemlerden oluşur. Bunlar ufalama, eleme, öğütme, sınıflandırma, zenginleştirme, katı-sıvı ayrımıdır. Bu temel işlemlerin yanı sıra tesis tasarımında yer alması gerekli bazı yardımcı işlemler ise sırasıyla aşağıda verilmektedir (Yersel, 2012):

- Numune alma ve tartım,
- Malzeme nakliyesi, kuru malzeme için bantlı konveyörler; ince taneli pülpler için boru hatları, pompalar, oluklar; iri taneli sulu malzeme için kovalı elavatörler,
- Stoklama, stok sahaları, silolar, pülp havuzları,
- Artık uzaklaştırma ve tesis suyu geri kazanımıdır.

Yeterli stoklama ve ara depolama birimleri, tesiste oluşabilecek herhangi bir arıza nedeniyle tesisin diğer bölümlerindeki operasyonların da kesintiye uğramaması için gereklidir. Genel olarak gereksinim duyulan stoklama veya depolama noktaları şunlardır:

- Madendeki üretimin kesikli olması nedeniyle maden ile cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisi arasında açık veya kapalı bir stok alanı,
- Kırma ve öğütme devrelerinin bağımsız çalışmasını sağlamak için kırılmış cevherin depolanabileceği silolar,
- Zenginleştirme devresine düzgün besleme yapabilmek için pülp havuzu,
- Flotasyon devrelerinde kondisyonlama yapabilmek için karıştırma mekanizmalı tanklar.

Akım şeması ile birlikte hazırlanması gereken iki önemli çizelge vardır. Bunlardan birincisi, akım şemasına uygun olarak kütle denkliği çizelgesi ve diğeri de makine ve ekipmanların tanımlanması ve tesise teslim maliyetlerini gösteren bir çizelgedir.

2.4 Fizibilite Çalışmaları

Tasarım öncesi yapılması gerekli etütler fizibilite etütleridir. Fizibilite çalışmaları ön fizibilite çalışmaları olarak birbirini izleyen iki aşamada yapılır.

2.4.1 Ön Fizibilite Çalışmaları

Yeni bir cevher hazırlama ve zenginleştirme tesisinin tasarımı için gerekli ön deneyler yapılıp yeterli düzeyde tasarım veri tabanı oluşturulduktan sonra akım şeması genel hatları ile kesinleştirilir. Daha sonra yapılan teknik ve ekonomik değerlendirmelerin bir ön fizibilite raporu halinde sonuçlandırılmasına çalışılır. Bir ön fizibilite raporunda bulunması önerilen konular şu başlıklar altında toplanabilir:

- Tesisin coğrafi yeri
- Projenin tanımı
- Çalışma özeti ve varılan sonuçlar
- Jeolojik veriler, muhtemel cevher rezervleri
- Ön laboratuvar test çalışmalarına dayanan metalürjik sonuçlar
- Teknik yönden madencilik planı
- Üretim planı, ürünlerin satış değeri
- Maden sahasının haritası, yüzeydeki tesislerin ve yardımcı tesislerin planı
- Malzeme balansları ile tesisinin akım şeması
- Proje makina ve ekipman listeleri ve mali kaynaklar
- Sabit sermaye tahmini
- İşletme maliyeti tahmini
- Çevre ile ilgili dikkate alınacak hususlar
- Önerilen projenin ekonomik olarak değerlendirilmesi

2.4.2 Son Fizibilite Çalışmaları

Son fizibilite etütleri 5 ile 8 ay sürebilen ve uzun bir zaman alabilen çalışmalardır. Son fizibilite çalışmalarının maliyeti de genellikle tüm sermaye maliyetinin %0,5-1,5

arasında değişir. Bu çalışmalar, genellikle konu üzerinde ihtisaslaşmış uzman şirketlere yaptırılır.

2.5 Tesis Ekonomisi

Endüstriyel tesislerin amacı kazanç elde etmektir. Tesisten elde edilecek kazancın, tesis için yapılan sermaye yatırımına göre tesisin büyüklüğü veya yapılan yatırımın değerini belirler. Bu nedenle tesis tasarım aşamasında;

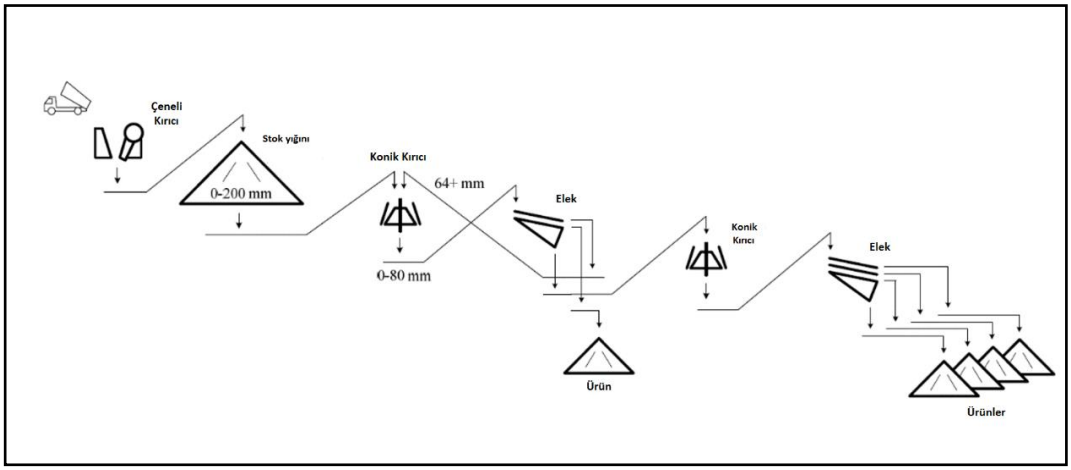
- Sermaye yatırımının
- Tesis işletme giderinin
- Ürün satış fiyatlarının
- Yatırım değerlerinin tahmini gerekir ve tesis tasarım ve ekonomik değerlendirme süreçlerinin birbirlerini etkileyen kavramlar olduğu unutulmamalıdır.

2.5.1 Yatırım Değeri

Tasarlanan bir tesis veya herhangi bir proje için yatırım işletme maliyetlerinin tahmininden sonraki aşama, bu yatırımdan elde edilecek kazancın gerekli yatırım ile karşılaştırıldığında projenin gerçekleştirilmesine değer olup olmadığının incelenmesidir. Bu değerlendirmenin her ülkenin kendine özgü koşulları altında sadece mali değil sosyal kıstasları da (iş sahası açmak, stratejik bir ürünü elde etmek gibi) içeren biçimde yapılması da mümkündür.

2.6 Kırma ve Öğütme

Kırma işlemi değerli minerallerin serbestleşme derecesine ulaşılana kadar yapılan boyut küçültme işlemidir (Asbjörnsson, 2013). Madencilik ve agrega üretiminde kaya malzemesinin boyut küçültme işlemi patlatma, kırma ve öğütme işlemleriyle elde gerçekleştirilebilmektedir. Cevher istenilen tane boyut dağılımı elde edilene kadar farklı boyut küçültme aşamalarından geçirilir. Şekilde 2.1'de kırıma devresi gösterilmiştir. Kırılan malzeme elekle sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır.



Şekil 2.1 Kırma tesisi akım şeması

Madencilikte boyut küçültme işlemi genel olarak üç farklı kırma ilkesi ile kategorize edilmiştir: baskı çarpma ve aşındırma. Bu ilkeler Evertsson ve Lee tarafından detaylı olarak açıklanmıştır (Evertsson, 2000; Lee, 2012).

Boyut küçültme işlemi ocakta patlatma ile başlamasına rağmen, madencilik ve cevher hazırlamada boyut küçültme kırma ve öğütme işlemlerini ifade etmektedir.

Öğütme değerli mineralin gangdan ayrılmasını sağladığı için cevher hazırlamada önemli bir aşamadır. Kırma işlemi yeni mineral yüzeyi oluşturma şeklinde tanımlanabilir. Artan mineral yüzeyi liç ve flotasyon gibi kimyasal madencilik için önemlidir.

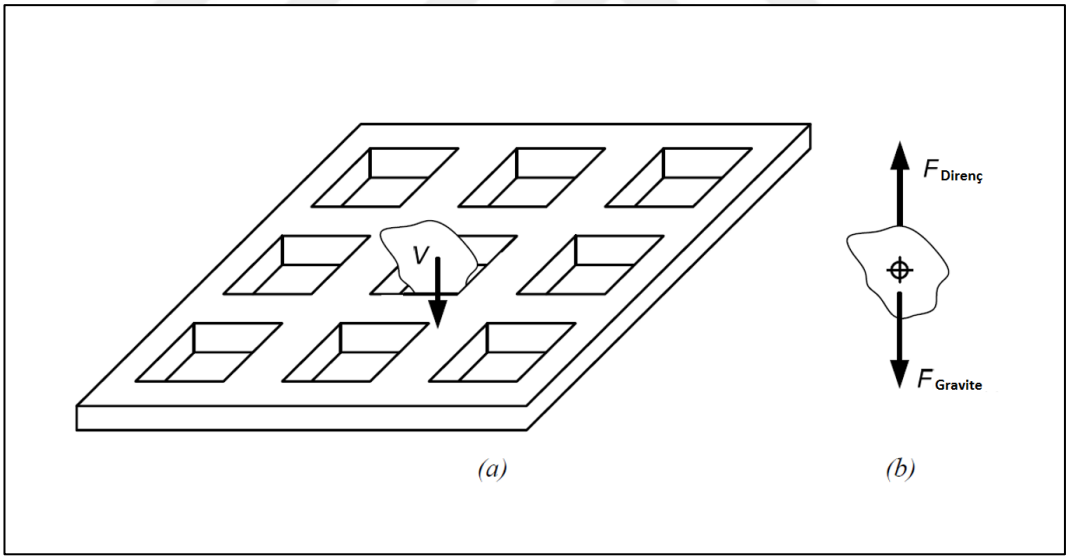
Boyut küçültmede enerji tüketimi boyut küçültme oranı, ürün boyutu ve malzemenin sertlik özelliği (örneğin malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnç gibi). Kırma için gerekli enerji, ufalama oranı, ürün boyutu ve malzemenin özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur. Jancovic ve arkadaşları yapılan araştırmalarda üretilen teorik ve ampirik formülleri özetlemiştir (Jancovic ve diğ., 2010).

Madencilik işlerinde ufalama 1 metreden daha büyük kaya kütlelerinin 25 μmdan daha küçük boyuta indirgenmesini ifade eder. Fakat ufalama için harcanan enerjinin büyük bir bölümü (%89) yaklaşık olarak 20 mm ile 100 μm arasında tüketilmektedir

(Powell, 2010). Madencilik işleri için harcanan %1 ile %2 si verimli olarak yeni yüzey oluşumuna aktarılmaktadır (Tromans ve Meech, 2002).

2.7 Eleme ve Sınıflandırma

Sınıflandırma taneleri belirli sınıflara ayırma işlemidir. Kırma devresinde malzeme belirli tane boyutundan ayrılır. Malzemeyi boyuta göre ayırmak için eleme, hidrosiklon gibi yöntemler kullanılabilir. Beslenen malzemenin tane boyut dağılımını belirlemede genel olarak eleme yöntemi kullanılır. İri malzeme için titreşimli elekler ya da ızgaralar kullanılır. Burada, elek yüzeyinin eğimi ve salınım hareketinden dolayı malzeme elek yüzeyinde tabaka halinde akar. Bu hareket tanelerin elek yüzeyi ile temas etmesini ve elek açıklığından küçük olanların Şekil 2.2'deki gibi bu açıklıktan elek altına geçmesini, elek açıklığından büyük olanlarında elek üstünden akarak eleği terk etmesini sağlar (Stafhammar, 2002).



Şekil 2.2 Belirli bir tane boyutunda ayırma için iki yöntem gösterilmiştir; (a) eleme, (b) gravite ve direnç kuvvetleri

2 milimetreden küçük fraksiyonlarda, elek açıklıklarının tıkanması ve malzemenin topaklanmasından dolayı eleme verimi düşmektedir. 2 mm'nin altındaki boyutlarda sınıflandırma yöntemi olarak havalı sınıflandırıcılar ya da hidrosiklonlar kullanılabilir (Johansson, 2011). İki yöntemde aynı prensibe dayanmaktadır, ancak hava veya su

gibi farklı ayırma ortamı kullanılmaktadır. Şekil 2.2a'da gösterildiği gibi eğer bir tane üzerinde akışkan ortamdan kaynaklanan bir direnç kuvveti var ve bu kuvvet yerçekimi kuvvetinden büyük ise, bu tane akışkan ortamı takip eder. Diğer yandan, eğer yerçekimi kuvveti direnç kuvvetinden büyük ise, tane yerçekimi doğrultusunda aşağı doğru hareket eder (Johansson, 2011).

2.8 Zenginleştirme Birimlerinin Tasarımı

Boyut küçültme, kırma - eleme - öğütme - sınıflandırma sonucunda birbirlerinden teknik ve ekonomik olarak istenilen derecede serbestleşmiş olan mineral tanelerinin fiziksel ve fizikokimyasal özelliklerindeki farklılıklardan yararlanarak yapılan ayırma işlemleri zenginleştirme olarak adlandırılır.

Herhangi bir zenginleştirme işlemi için en uygun akım şemasının ve zenginleştirme aygıtlarının seçimi cevher içindeki değerli ve değersiz tüm minerallerin; cinsine, fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal özelliklerindeki farklılıklara ve serbestleşme boyutlarına bağlıdır. Çok benzer mineralojik bileşimleri bile olsa, hiçbir cevherin birbirinin aynı olmadığı ve standart zenginleştirme işlemlerinin birebir uygulanamayacağı da bilinen bir gerçektir.

Boyut küçültme işlemleri sırasında cevheri oluşturan mineraller bazı yapısal (dayanıklılık, kırılış şekli, dilinim vb.) özelliklerine bağlı olarak farklı büyüklük ve şekilde kırılabilirler. Bazen değerli mineral iri kalırken değersiz mineral fazla ufalanabilir, bazen de bunun tersi olur. Her iki durumda da boyuta göre sınıflandırma ile değerli mineral belirli ölçülerde zenginleştirilebilir. Örneğin;

- Sedimanter oluşumlu yumrulu demir, mangan ve fosfat cevherleri boyut küçültmeye tabi tutulduklarında, yumrular iri kalırken çimentoyu oluşturan kalker daha fazla ufalanır.
- Killi cevherlerin kırılması ve dağıtılması sırasında kil mineralleri çok küçük boyutlara indiği halde, diğer mineraller iri kalır (örneğin bor cevherleri).

- Mika, nabit Au, Ag, Cu gibi levha şeklinde kırılan mineraller, birlikte bulundukları diğer minerallere göre daha iri boyutta kalırlar.
- Kömür, yan taşlarına göre daha fazla ufalanır.

Boyuta göre sınıflandırma, cevher özelliklerine bağlı olarak, ya doğrudan doğruya boyut küçültmeden sonra ya da yıkama ve dağıtma gibi işlemleri izleyerek uygulanmaktadır.

Dağıtıcı olarak kullanılan aygıtlar:

1- Karıştırma ile dağıtma yapan aygıtlar

- Yalaklı yıkayıcı (maksimum cevher boyutu 10 cm)
- Pervaneli dağıtıcı (Attrition Scrubber): 4-5 mm'nin altındaki cevher %70-80 katı içeren pülp halinde beslenmektedir.
- Kütüklü dağıtıcı: Besleme boyutu 7 - 8 cm

2- Aktarılan ortamda dağıtma yapan aygıtlar

- Aktarma tamburu: Besleme boyutu 10 cm fakat özel tiplerde 25 cm'ye kadar olabilmektedir.
- Döner elekli (tromel) yıkayıcı

3- Basınçlı su ile çalışan dağıtıcılar

Yıkayıcı ve boyutlandırıcı olarak kullanılan aygıtlar şunlardır:

- Kavisli elek
- Tromel elek
- Titreşimli elek
- Taraklı ve spiralli klasifikatörler
- Hidrosiklonlar

2.9 Katı-Sıvı Ayrımı Birimlerinin Tasarımı

Katı tanelerinin, taşıyıcı ortama olan sudan ayrılması çevresel etkenler, atık malzeme ve suyun geri kazanımı için bir gerekliliktir. Susuzlandırma pülpün yapısına ve üretilecek ürünün standartlarına göre gerçekleştirilmelidir. Cevher hazırlamada yaygın olarak iki tür katı - sıvı ayrım yöntemi kullanılır: sedimantasyon ve filtrasyon. Sedimantasyon işlemi durultma ve koyulaştırma olarak alt bölümlere ayrılır (Yersel, 2012).

2.9.1 Koyulaştırma (Thickening)

Koyulaştırma nispeten yoğun şlamların susuzlandırılması prosesleri için önemlidir. Pülp yerçekimi kuvvetinin etkisi altında çöktürülür ancak taneler birbirlerine engel olacak kadar yakın olduğu için ayrı ayrı çökmek yerine birlikte bir kütle halinde çökelirler. Çökelme oranı uygun tikiner boyutu dizaynını belirlemek için uygun flokülasyon şartlarında deneysel olarak belirlenmesi gereken pülpün temel karakteristiğidir. Çökelme oranı pülpü oluşturan tanelerin yapısına ve elde edilen flokülasyon derecesine bağlıdır. Floküle olmuş belirli bir pülp için çökelme oranı pülpün bölgesel katı içeriğine göre belirlenir ve pülpte her bir noktada değişiklik gösterir.

2.9.2 Filtrasyon

Filtrasyon cevher hazırlama tesislerinde susuzlandırma işlemlerinde kullanılır ancak filtrasyonda sıklıkla bir takım darboğaz teşkil eder. Bunun sonucu olarak, filtrasyondan kaçınmak için alternatif prosesler tercih edilir. Filtrasyon işleminde genellikle vakumlu filtreler kullanılır. Bu filtreler döner tambur, döner disk ve yatay bant filtrelerdir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yatay döner tamburlu filtrelerdir (King, 2001).

BÖLÜM ÜÇ
CEVHER HAZIRLAMA VE ZENGİNLEŞTİRME TESİS TASARIMI İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ SİMÜLASYON YAZILIMLARI

3.1 Bruno: Metso Kırma Tesisi Simülatörü

Bu program, tesisteki her bir fraksiyonun tonajını kontrol altında tutan DOS tabanlı SIMU isimli daha eski bir kütle - balans programını temel almaktadır. SIMU ya göre Bruno'da devredeki cihazları ve bu cihazların birbirleri ile ilişkisini bulmada kullanılan grafiksel donanımı saha üstündü. Bu program kırıcıya gelen yükten yola çıkarak, hesaplanmış çalışma kapasitesine göre çalışma yüzdesini verebilmektedir. Eleme verimi hesaplanmış eleklerden gelen akımları hesaplar (Mullar, Halbe ve Barrat, 2002).

Programda devre elemanları içeren bir bölüm yer almaktadır. Bir kırıcı simgesinin üzerine tıklanarak kırıcının devrede yer alması sağlanabilmektedir. Bu işlem besleyici, elek, stok ya da diğer ekipmanlar için yapılabilmektedir.

Bu program besleme malı, besleyici ve titreşimli besleyici, birincil döner kırıcılar, çeneli kırıcılar, konik kırıcılar, darbeli kırıcılar, Kullanıcının seçimi (Metso üretimi olmayan kırıcılara ait karakteristik özellikleri girilebilir), sınıflandırma için elekler, silolar ve atık depoları yer almaktadır.

Akım şeması belirlemede başlangıç olarak program çalıştırıldığında açılan şablon kullanılır. Bu şablonda besleme malı simgesi yer almaktadır. Bu simge yardımıyla beslenecek malzemenin özgül ağırlığı ve ismi gibi özellikler ayarlanabilir. Eğer besleme malının tane boyut dağılımı biliniyorsa "Kullanıcı Fraksiyon Seçimi" kullanılarak programa girilebilir. Bunun yanında programın veri tabanında yer alan saha tecrübelerine dayanan tane boyut dağılımı da seçeneklerde yer almaktadır.

Tesis tanımı ve bilgi kutucukları özel olarak doldurulup belirlenebilir ya da sunulan alternatiflerden seçilebilir. Akım şeması şablonun da yer alan kullanıcı adı ve tarihini bölümü doldurulabilir.

Sonraki aşamada titreşimli besleyici veya bir elek şeklinde sınıflandırma makinesi ya da primer döner kırıcı veya çeneli kırıcı seçimi yapılabilir. Ekipman bölümünden bir simgeye tıkladıktan sonra akım şeması üzerinde herhangi bir noktaya tıklayarak akım şeması üzerinde bu ekipmanlar konumlandırılabilir. Besleyici, elek yada kırıcı ekipmanların model, boyut, ayarlar ve kapasite faktörlerini belirlemek için simge üzerine çift tıklayarak veri penceresi açılır.

Kırıcı ve elekler şablonun üzerinde istenilen yere yerleştirildikten sonra "Connect" modu kullanılarak birbirlerine bağlanır. İlk yerleştirilen objenin çıkışı tıklanıp ikinci objenin girişi tıklanarak iki obje arasında seçilen matematiksel modele göre bağlantı kurulur.

Tüm ekipmanlar belirlenip birbirine bağlandıktan sonra devre simülasyonu araçlar menüsünde bulunan "hesapla" butonu tıklanarak simülasyon başlatılır. Sonuçlar incelendikten sonra, düzeltmeler ve ayarlamalar bu devrede arzu edilen sonuçlara göre yapılır.

3.2 Plant Designer: Kırma ve Eleme Tesisi Modelleme Aracı

Plant Designer programı kırma-eleme tesisi akım şeması çizimi ve simülasyonu yamak ve simüle edilmiş akım şeması üzerinde malzeme kütle balansı hesabı yapmak amacıyla tasarlanmıştır (Mullar, Halbe ve Barrat, 2002).

- Akım şeması veri tabanından seçilen simgelerle oluşturulur.
- Akım şemasındaki birimlerin özellikleri, üzerlerine çift tıklanarak açılan iletişim kutularından seçilir.
- Akımların hesaplamaları akım şemasındaki bütün ekipmanların bağlantıları oluşturulduktan sonra yapılabilir.

- Plant Designer programı ne kadar doğru oranda veri girilirse o kadar doğru sonuçlar elde edilir.
- Hızlı bir şekilde model oluşturmak için
- Karmaşık sistemler bile kolayca oluşturulabilir ve anlaşılabilir.

3.3 Usim Pac 3: Kırmadan - Arıtmaya Cevher Hazırlama Tesislerinin Tasarımı ve Optimizasyonu

Bu paket program deneysel verileri işleme, kütle balans hesaplama, tesisteki birimlerin boyut ve ayarları, işlenen cevherin fiziksel özellikleri, tesis işleyişini simüle etme ve sonuçları grafiksel ve tablolar halinde verebilme gibi fonksiyonları içermektedir.

Tesis ilk tasarımında öncelikli olarak cevher özelliklerine ve ana performans hedeflerine dayalı akım şeması açısından tesis gerekliliklerinin değerlendirilmesinden meydana gelir ve simülasyon ile bir kütle balansı kurulur. Sonraki aşama simülasyondan yola çıkılarak ana ekipmanlar boyutlandırılır.

Tesis optimizasyonu için ön tasarım çalışmaları;

- Fizibilite çalışmalarında
- Laboratuvar ve pilot testlerden gelişmiş tasarıma
- Yeni cevher ve yeni pazarlar için devre adaptasyonunda
- Devre optimizasyonunda kullanılmaktadır.

Kırma, öğütme, sınıflandırma, zenginleştirme ve hidrometalurji gibi alanlarda kullanılabilmektedir.

Demir, baz metaller, değerli metaller, fosfat, potasyum, kaolin, feldspat, karbonatlar gibi endüstriyel mineraller ve agrega, çimento, plaster gibi inşaat sektörü hammadde zenginleştirme tesislerinde kullanılmaktadır. Aşağıda programın tesis tasarımı ve optimizasyonu çalışmalarındaki fonksiyonları belirtilmiştir (Mullar, Halbe ve Barrat, 2002):

Tasarımdaki işlevleri;

- Proses değerlendirme için laboratuvar testleri yapılarak tesis ilk boyutlandırması,
- Pilot testlerde metalürjik performans doğrulama, tutarsız verilerin iyileştirilmesi, ekipman boyutlandırma ve yatırım maliyet tahmininde kullanılabilir,

Optimizasyondaki işlevleri:

- Metalürjik takip, numune alma, kütle balans uyumu, proseslerin ve devre performansını kontrol altında tutma
- Optimizasyon, endüstriyel boyutta testlerin maliyeti yüksek olduğu için simülasyon ile bu giderlerin önlenmesi
- Tesise beslenen cevher özelliklerinin değişimi ve farklı kalitede üretilecek ürün için simülasyon tekniği ile tahminlerde bulunabilme

Teknik hizmetleri

- Tesis denetimi;
  - Numune alma işleri,
  - Metal balansı,
  - Proses modelleme ve simülasyonu,
  - Proses parametre belirleme,
  - Maliyet hesaplama

- Proses adaptasyonu ve optimizasyonu;
  - Yeni ekipman testleri,
  - Yeni kurulum testleri,
  - Maliyet tahmini

3.4 Metsim

METSIM, inorganik kimyasallar, hidrometalurji, pirometalurji, alternatif enerji ve çevreye duyarlı çeşitli proseslerin simülasyonunu doğru olarak yapan bir yazılımdır.

Tasarım mühendisleri Metsim'in fonksiyonlarından büyük oranda faydalanmaktadır. Metsim yazılımı temel, maden, ufalama, ısı balansı, dinamik simülasyon, konturlama, maliyet ve mühendislik modüllerini içermektedir. Demir ve Çelik Modülleride geliştirme aşamasındadır (Metsim Features, 2009).

Temel Modül; flotasyon, liç, katı/sıvı ayrımı, solvent ekstraksiyonu, elektroliz ve tanklar, pompalar, silolar, stoklar gibi çok sayıda ekipmanların simülsyonu için kimyasal, zenginleştirme ve hidrometalurjik birimleri içermektedir.

Ufalama Modülü; kırma, eleme, öğütme, sınıflandırma, gravite, ağır ortam ve kömür hazırlama birimlerini içerir. Bu modül proses için serbestleşme ve tane boyut analizi kriter olduğunda kullanılmaktadır.

Isı Balans Modülü; otoklav, kurutucular, fırınlar, ocaklar, kaynatıcılar, buhar ve gaz ekipmanlarını içermektedir.

Dinamik Simülasyon Modülü; yığın liçi, solar enerji / hava durumu etkisi, atık havuzu veya beslemede büyük miktarda değişikliklerin olduğu proseslerde zamana bağlı modeller üzerine yoğunlaşmıştır.

Konturlama Modülü; DXF dosyalarından kompleks yığın liçi ve atık tesisi modelleri oluşturmak ve veri grafikleri oluşturmak için kullanılır.

Maden Modülü sondaj; maden blok modeli ve madencilik verilerinin girilmesini sağlar. Atık barajlarına, yığınlara, stoklara ve tesise besleme doğrudan ocaktan alınabilir. Bu dinamik simülasyonun işletmenin yapıldığı süre boyunca uygulanmasına olanak sağlar.

Mühendislik Modülü; proses mühendisine ön tasarım hesapları, ekipman boyutlandırma, ekipman ve araç listesi oluşturma, simülasyon ve test proses kontrol stratejileri ve operatör eğitim ara yüzü uygulamalarına olanak sağlar.

Maliyet Modülü; tesis işletme maliyetlerini hesaplayıp rapor olarak verir. Ayrıca insan gücü, yakıt ve sarf malzemesi, malzeme satın alma ve yer değiştirme programını hesaplayan, sermaye ve işletme maliyet programı OPCOST'u içermektedir.

Cevher hazırlama tesislerinde simülasyon uygulamaları için geliştirilmiş olan bu yazılım beş fonksiyonda bir projeyi tamamen simüle edebilmektedir. Bu fonksiyonlar (Metsim Features, 2009):

- Ölçülen tesis verileri ile tutarlı kütle balans hesaplamaları
- Gerçek tesis verilerinden yola çıkılarak ekipman parametreleri belirleme
- Yerinde simülasyon uygulaması ile alternatif uygulamalar için kütle ve enerji balansı
- Tasarım kriteri ve kütle balansına dayalı ekipman boyutlandırma
- Dinamik simülasyon hesapları

Akım Şeması Özellikleri:

- Akım şeması ve dinamik grafikler
- Görselleri büyük akım şeması
- Akım şemasında kısmi bölümlerin çalışabilir olması
- Tutarlı akım şeması tahmini
- Yeni birim eklemenin kolay olması
- Sınırsız akım çizebilme

Kimyasal zenginleştirme özellikleri:

- Online termodinamik veri tabanı
- Kimyasal kinetikler ve faz dengesi
- Katı, sıvı, ergitme, gaz fazları

Proses Kontrol:

- Geribildirim ve PID kontrolörleri
- Mantık / Uzman kontrol sistemleri
- Kullanıcı tarafından eşitlik belirlenmesi

Bütçelendirme:

- İşletme maliyetleri
- Madencilik maliyetleri

Grafiksel Arayüz:

- Tamamen interaktif programa ve menüler
- Anlık sonuçlar

Uyumlu Olduğu Yazılımlar:

- Akım şeması Excel ara yüzü
- DDE Excel ara yüzü
- DXF AutoCAD ara yüzü

3.5 JKSimFloat

Köpük flotasyonu cevher hazırlamada en önemli ve karmaşık prosestir. Yıllardır büyük gelişme ve araştırmalara rağmen hala flotasyon tesisi tasarım ve tesis işletimi büyük oranda tecrübe ve izlenimlere dayanmaktadır. Bu durum sıklıkla verimsiz tesis tasarımına ve tesisin devreye girmesinde uzun zaman kaybına sebep olmaktadır.

JKSimFloat paket programının temel amacı flotasyon tesislerinin simülasyonunu gerçekleştirmektir. Flotasyon tesis mühendisleri, operatörler, araştırmacılar ve danışmalarının ihtiyaçları ve sorunların çözümünde kullanmak amacıyla geliştirilmiş bir programdır (JKSimFloat User Manual, 2014).

Devre simülasyonunun yanı sıra veri analizi, tesis tasarımı ve optimizasyonu ile ilgili görevler entegre olarak JKSimFloat' da yer almaktadır. Tamamen interaktif ve yüksek çözünürlükte grafiklerle çalışmaktadır. Bu grafikler flotasyon akım şemasının ve akım şeması üzerindeki bilgilerin detaylı olarak gösterimini sağlamaktadır. JKSimFloat paket programı tesiste dikkate değer verim ve tenör artışı sağlamaktadır.

Bu güne kadar her biri kendi proses şartlarına uygun olarak en karmaşık seksenin üzerinde flotasyon devresi simüle edilmiştir. Simülasyonun bir kaç saat sürdüğü hesap tablosu tabanlı eski yöntemlerle karşılaştırıldığında, karmaşık yapıdaki devrelerin JKSimFloat ile simülasyonu sadece birkaç saniye gerekmektedir.

JKSimFloat kullanıcılara aşağıdaki olanakları sağlamaktadır:

- Tesisin grafik tabanlı akım şemasını oluşturma
- Makine ekipman kriteri ve model parametreleri tayin etme
- Akım şemasındaki değişikliklerin akımlarda tane boyut dağılımları ve metal dağılımlarındaki etkisini tahmin etmek için simüle eder
- Simülasyon aracılığıyla tenör ve verim hesabı
- Yeniden öğütme ve reaktif ilavesinin etkisini tahmin etmek için flotasyon parametrelerini ayarlama

3.6 JKSimMet v 6.0.1

Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRC)'de geliştirilen bu program, özellikle tesislerin ve tesis karakterizasyonu yapmak için proses analiz teknikleri uygulayan metalurjistlerin gelişimi için ve alternatif tesis tasarımları değerlendirmek için modelleme yapan tasarım mühendisleri için geliştirilmiş bir paket programdır. Cevher hazırlama tesislerinde ufalama ve sınıflandırma devrelerinin simüle edilmesini sağlamaktadır.

1980'lerin başında AMIRA (Australian Mineral Industry Research Association) P9 projesinin bir parçası olarak bir ilk örneği geliştirilmiştir. JKTech tarafından veri analiz uygulaması eklenerek 1986'da ilk ticari sürümü yayınlanmıştır.

1970'lerin sonlarıyla birlikte FORTRAN'ın alt programlarında önemli gelişmeler gerçekleştirilmiştir. Her bir alt program farklı cevher hazırlama birimlerini modellemek üzere tasarlanmıştır. Bu alt programlar ve bunların parametre tahmini, kütle balans programı GSIM paket programıdır. O dönemin bilgisayarlarında çalışması endüstride kullanım imkânı sağlamıştır.

Basit veri analizi araçları, Modelleme Modülü (Model-Fitting) ve simülasyonun cevher hazırlama birimleri modellerinden oluşan geniş veri tabanıyla kullanımı kolay grafiksel ara yüz yapısı altında entegre olması, bu teknolojinin endüstride büyük oranda kabul görmesini sağlamıştır.

Veri analizi, optimizasyon, tasarım ve simülasyon, model uygulama ve depolama, veri ve sonuçlar entegre olarak JKSimMet içerisinde yer almaktadır. Devrelerin kütle balansı ve model geliştirme standart özellikleridir. Tamamen interaktif ve yüksek çözünürlükte grafiklere sahiptir.

JKSimMet ile bir ufalama devresi oluşturulduğunda, su ilavesi, siklon ağız açıklığı, değirmen hızı, bilye boyutu, bilye şarjı, AG/SA çalışma şartlarındaki değişiklikler ve besleme malındaki boyut dağılımı, kırılma özellikleri ve besleme miktarındaki değişiklikler kolayca simüle edilerek etkileri tahmin edilebilmektedir.

Bu simülasyon sonuçları boyut dağılımı, devredeki bütün akımların pülp yoğunluğu ve miktarı ve kırıcı ve değirmen gücü, AG/SAG değirmen şarjı ve siklon çalışma basıncı gibi önemli ekipmanların çalışma parametrelerini içermektedir. Bu sonuçlar grafiksel ve tablo şeklinde alınabilmekte ve Excel veya Word'e aktarılabilmektedir.

JKSimMet aşağıdaki işlevlere sahiptir:

- Cevher hazırlama tesislerinin grafiksel akım şemasını oluşturma
- Tesisin model parametrelerini ve makine kriterlerini belirleme
- Çalışma şartlarındaki değişikliklerin etkilerini simüle ederek ürün üzerindeki etkilerini tahmin etmek
- Tesis kapasitesini ve verimini içerecek şekilde optimum çalışma şartlarını belirleme

Programın standart özellikleri:

- Verilen akım şemasının grafiksel olarak gösterimi
- Modellerin yer aldığı dahili kütüphane
- Model parametrelerinin kullanıcı tarafından belirlenebilmesi

- Elde edilen verilerin görüntülenmesi ve Excel raporları
- Verilerin kolayca alınabilmesi ve transfer edilebilmesi

Mevcut modeller:

- Çubuklu ve Bilyalı değirmen
- Otojen ve Yarı Otojen değirmen
- Kırıcılar
- HPGR
- Titreşimli Elek-Tek ve Çift Katlı Elek
- DSM elek
- Hidrosiklon
- Verimlilik Eğrisi
- Ayırıcı

3.6.1 JKSimMet Paket Programı ile Akım Şeması Oluşturma

Eğitimleri ve doğal yatkınlıktan dolayı mühendisler, cevher hazırlamayı akım şeması açısından düşünürler. Bu yüzden kullanıcıların bir akım şeması çizerek programa aktarabileceği grafiksel ara yüz herhangi bir entegre yazılımın gerekli bir parçasıdır. Operasyon birimlerini temsil eden simgeler, kullanıcı tarafından seçilir, prosesteki sırası ayarlanır ve grafiksel olarak gösterilen akımlarla birbirlerine bağlanır.

3.6.2 Veri Analizi

Genel olarak, proses değerlendirme işlemi simülasyon paket programı dışında yer almalıdır. Prosesin mevcut durumunu tanımlayan veriler toplanıp grafiksel akım şeması ara yüzüne girildiğinde bu verilerin doruluğu analiz edilmelidir. Veriler prosesin doğru bölgesini doğru bir şekilde temsil ediyor mu ya da herhangi bir uyumsuzluk var mı? Veri analiz fonksiyonu (Kütle Balansı olarak da ifade edilen) veri grubunun iyi veya kötü durumunun değerlendirilmesini entegre yazılım programı ile en iyi şekilde değerlendirilir. JKSimMet'in "Mass-Balans" (Kütle-Balans) modülü birçok zenginleştirme tesisinde ve metal balansında kullanılabilir. Kullanıcı akım

şemasını çizdikten sonra akımların verilerini programa girerek kütle-balans modülünü kullanabilir. Akım akım ilerleyerek, standart sapma tahminleri girilip veri kalitesi belirlenir, her bir veri denge elde edilene kadar JKSimMet ile akımdaki kütle miktarları belirlenir.

3.6.3 Model - Fitting (Modelleme)

Kütle balansı oluşturulduktan sonra, simülasyon sürecinin sonraki aşaması çeşitli modellerden gerekli performansı sağlayacak olanı belirlemektir. Model - Fitting birim operasyon modeller ölçülen gerçek verileri tam olarak tahmin edinceye kadar ayarlandığı ya da düzeltildiği adımdır. Kütle-balans'ta olduğu gibi kullanıcı veri kalitesini JKSimMet'e standart sapma tahmini ile tanımlar. Aynı zamanda kullanıcı hangi model parametrelerinin ayarlanacağını programda seçer.

3.6.4 Simülasyon

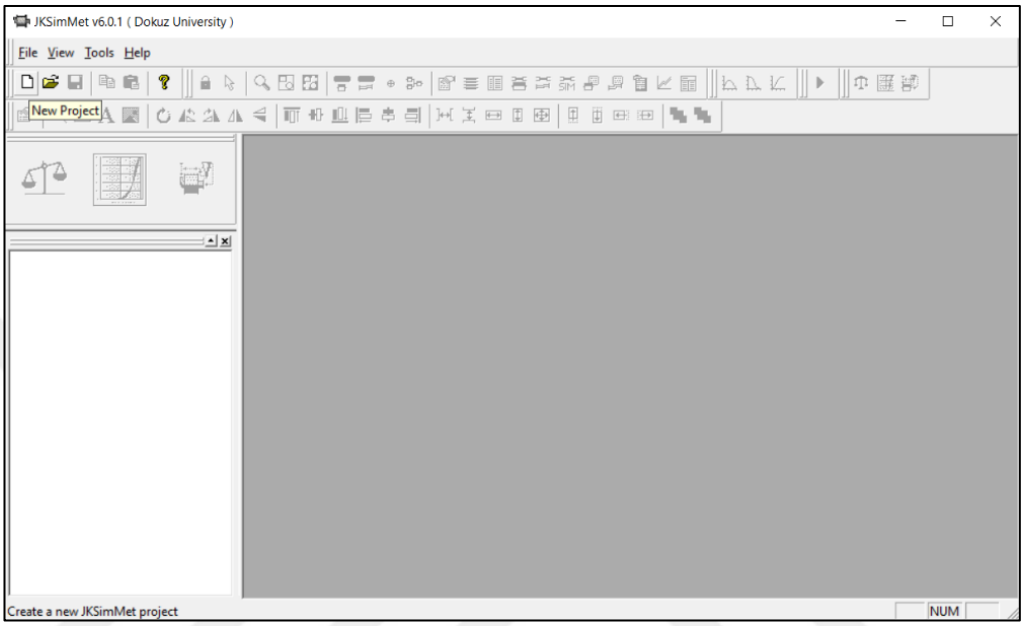
İlk olarak mevcut prosesin parametreleri ve çalışılacak modeli modelleme ile kesinleştikten sonra akım şeması simülasyona hazır hale gelmiş olur. Bu aşamada, Modelleme ile belirlenen model parametreleri sabit tutularak model tasarım değişkenleri test edilir. Bu değişkenler katı besleme oranı, su miktarı, katı ve sıvı özgül ağırlıkları, cevher ufalanma karakteristikleri, makine – ekipman özellikleri ve birim proseslerin düzenlerini içerebilir.

3.6.5 Raporlama

Simülasyonun gerçekleşmesi için programa veri girilmesi gerektiği gibi, veri analizi sonucu olarak modelleme ve simülasyon aşamaları da kullanıcıya veri oluşturmalıdır. Bir entegre simülasyon sistemi için iyi raporlama işlevi temeldir. Sonuçların özet ya da detaylı raporların yazdırılabilir ya da diğer uygulamalara aktarılabilir olması JKSimMet' in işlevleri arasındadır.

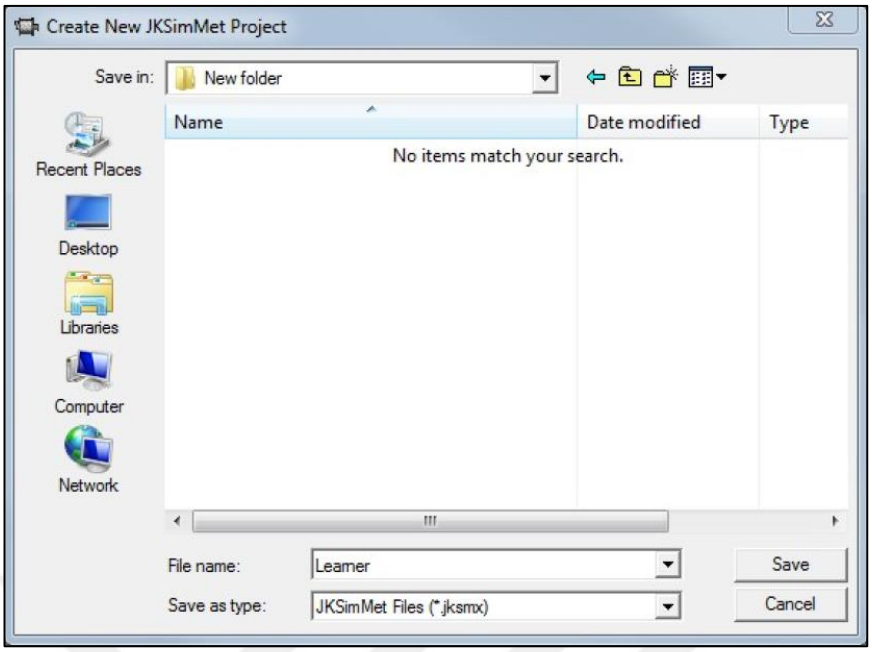
3.6.6 JKSimMet v 6.0.1. Nasıl Kullanılır?

Tesis tasarım ve simülasyon programı olan JKSimMet v 6.0.1 paket programı çalıştırıldığında Şekil 3.1'deki pencere açılmaktadır.



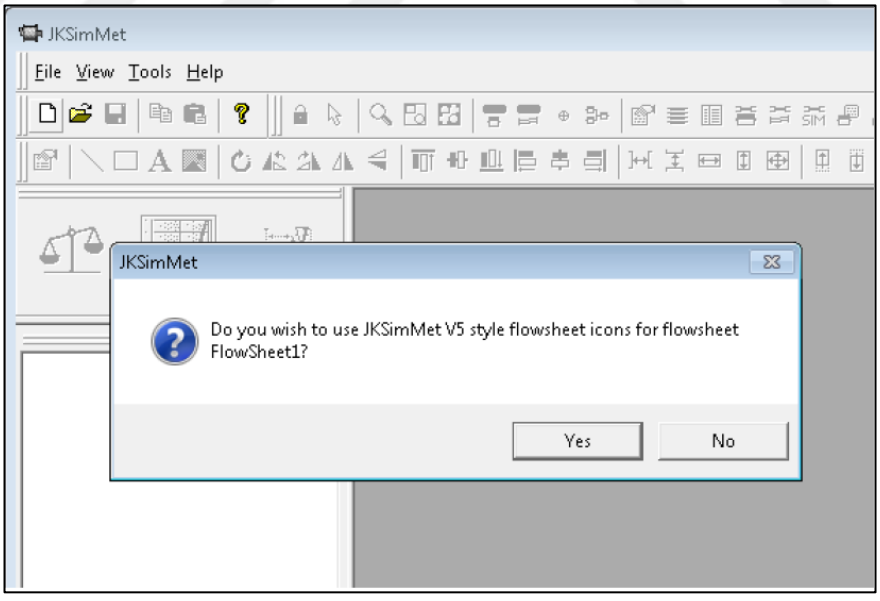
Şekil 3.1 JKSimMet paket programı açılış ekranı

Yeni bir proje oluşturmak için pencerenin sol üst köşesindeki araçlar kutusundan "Yeni Proje" simgesi tıklanır. Burada projenin adını ve bilgisayarda kayıt edeceğimiz yeri seçebileceğimiz bir iletişim penceresi açılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Yeni proje oluşturma iletişim penceresi

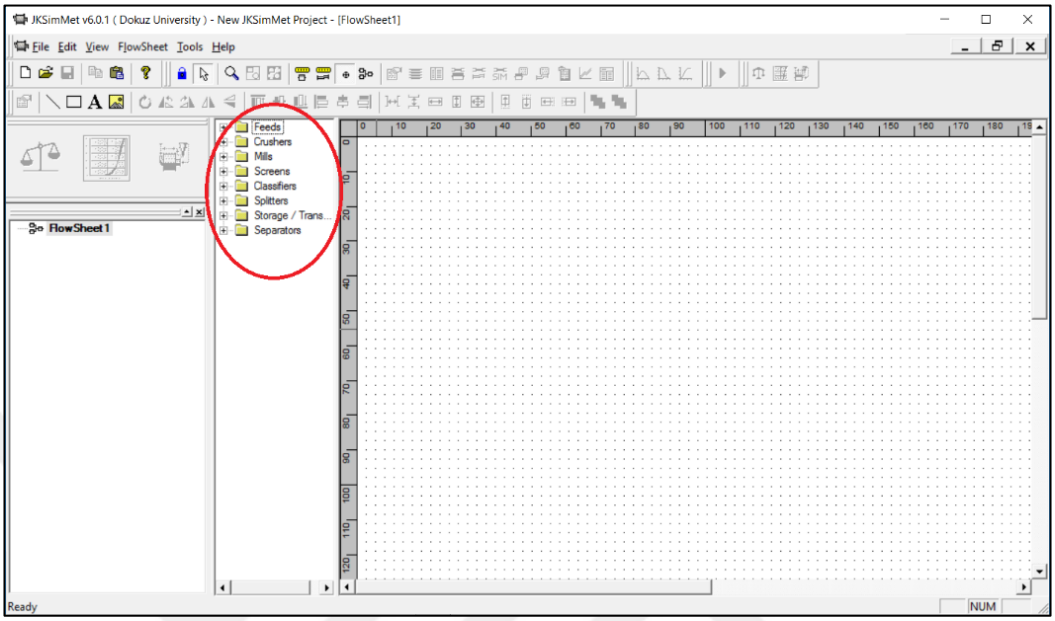
"Save" (kaydet) butonuna basıldığında program bize akım şemasındaki simge stillerinin Versiyon 5' deki gibi kullanılmasını sormaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 JKSimMet paket programında simge stillerinin seçimi

"No" butonuna basılarak JKSimMet v6 stili seçilerek paket programı artık akım şeması çizimine hazır hale gelmektedir (Şekil 3.4). Burada kırmızı renkle daire içine

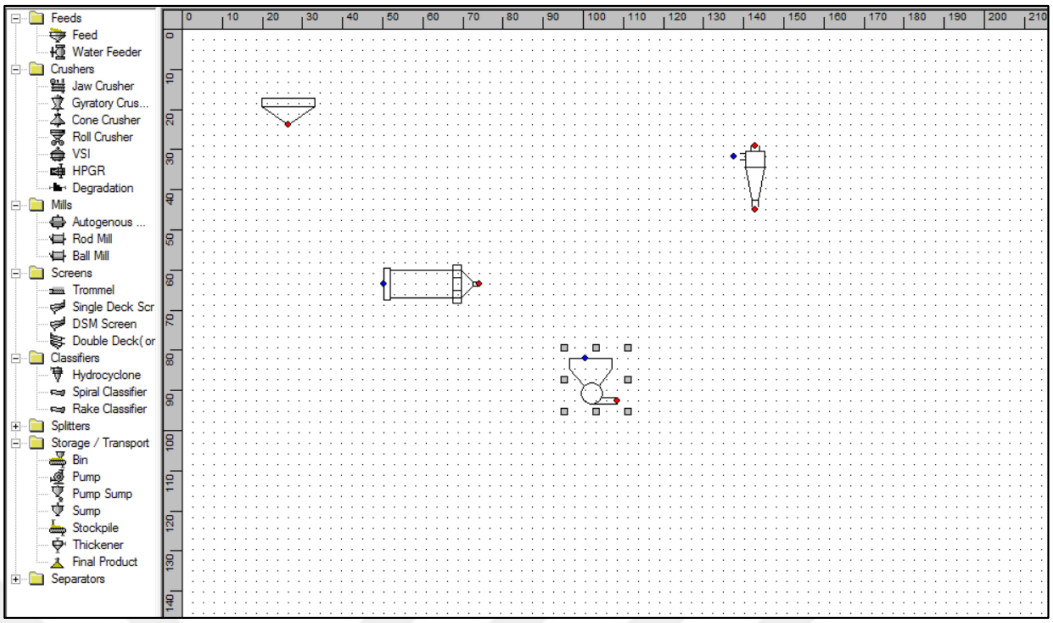
alınmış kısım akım şemasında kullanılacak cevher hazırlama tesisi ekipmanlarını içermektedir.



Şekil 3.4 JKSimMet v6.0.1 paket programı

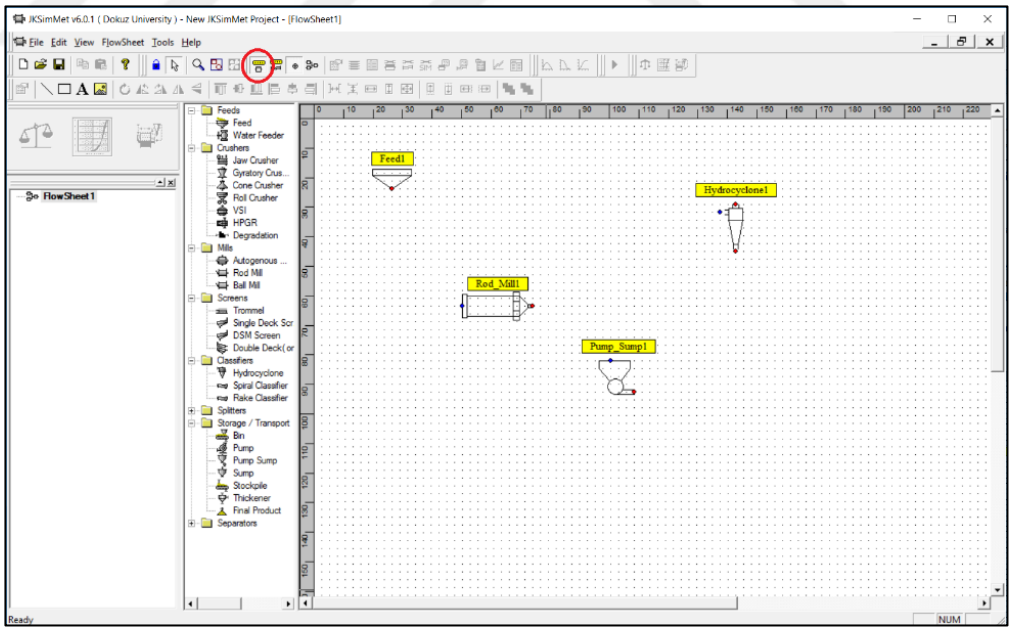
3.6.7 JKSimMet v6.0.1 Paket Programı ile Akım Şeması Çizimi

Sol panelde yer alan ekipman listesinden istenen ekipmanlar seçilerek akım şemasın üzerine sürüklenebilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Akım şemasına ekipmanların yerleştirilmesi

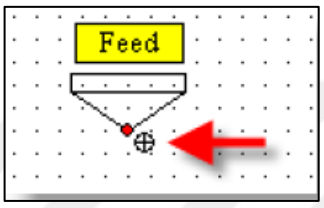
Akım şemasında ekipman isimleri eklenebilmektedir. Bunun için Şekil 3.6' da kımızı daire içine alınmış "Equipment Auto Labels" simgesine basmak yeterlidir.



Şekil 3.6 Ekipman etiketlerinin oluşturulması

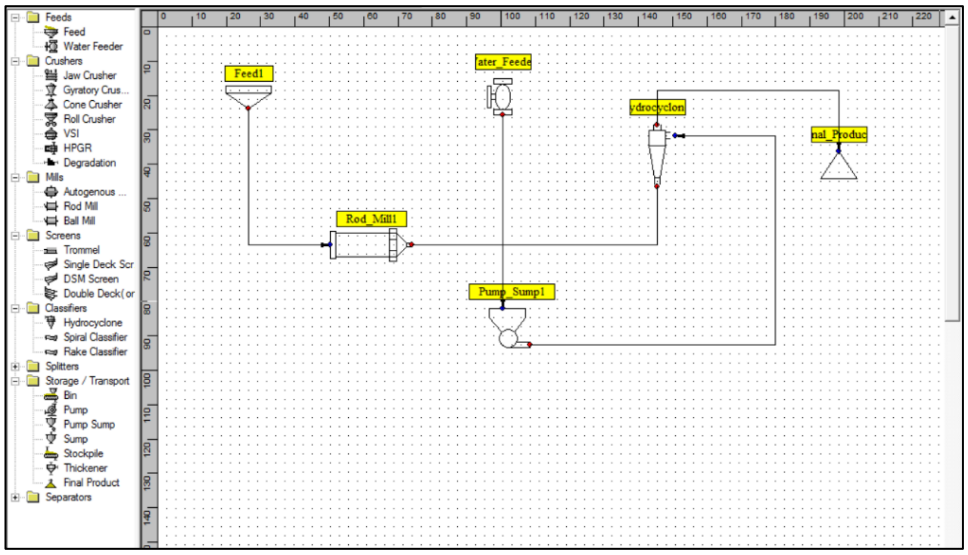
3.6.8 Ekipmalar Arasındaki Bağlantılarının Yapılması

Akım şemasında yer alan ekipmanların bir birleriyle olan bağlantılarının yapılması gerekmektedir. Bağlantıyı yapmak için Şekil 3.7' de görüldüğü gibi besleyicinin kırmızı ile işaretlenmiş çıkışına farenin imleci yaklaştırıldığında imleç otomatik olarak bağlantı noktasını yakalamaktadır. Farenin sol tuşuna basılarak ekipmana bağlantı yapılmış olur. Daha sonra diğer ekipmana gidilerek mavi ile işaretlenmiş giriş noktasına tıklanarak iki ekipman arası bağlantı yapılmış olur.



Şekil 3.6 Akım şemasında ekipmana bağlantı yapılması

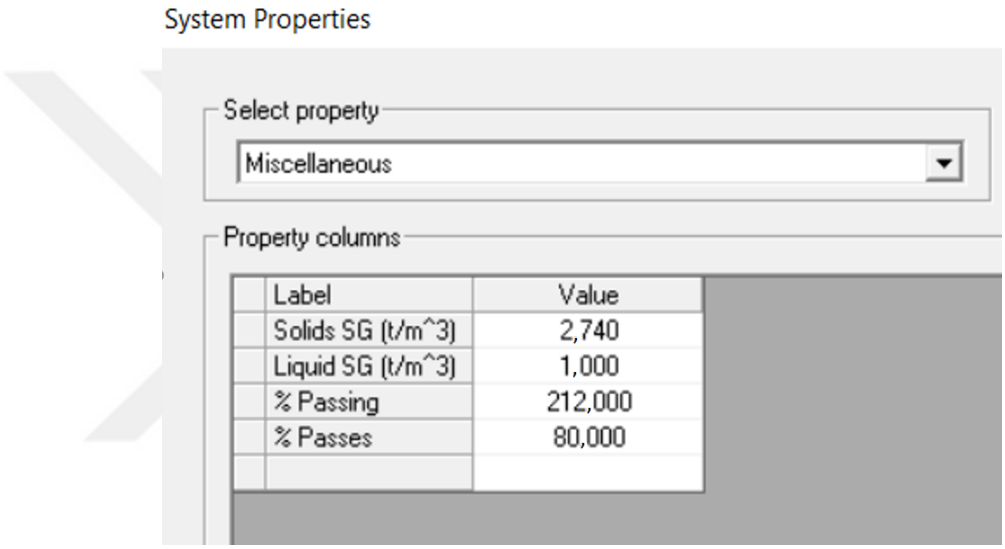
Akımlarla bağlantısı tamamlanmış örnek bir akım şeması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Bağlantıları tamamlanmış akım şeması

3.6.9 Sistem Özelliklerinin Belirlenmesi

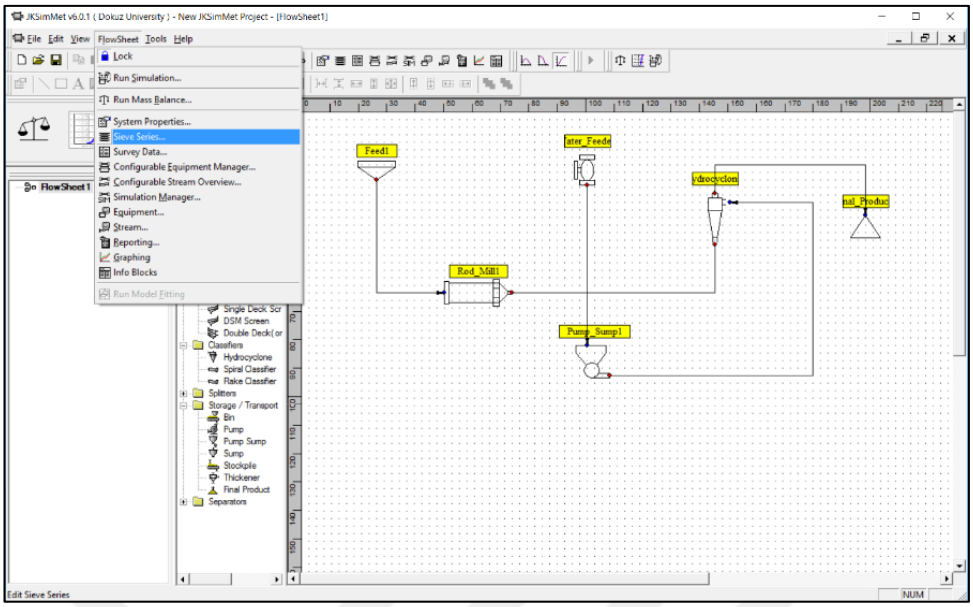
Akım şeması bütün ekipmanlar ve bağlantılarıyla tamamlandığında, bu akım şeması ile ilgili veriler artık sisteme girilebilir. Bunun için araçlar çubuğundaki “ ” simgesine basılır. Bu şekilde artık akım şeması kilitlenmiş olur. Akım şeması kilitliyken herhangi bir ekipman eklenemez veya silinemez. Daha sonra araçlar çubuğundan “ ” simgesi tıklanarak veya “Menu” den “System Properties” seçilir. Sistem özellikleri penceresi ilk açıldığında Şekil 3.8’deki gibi görünmektedir.



Şekil 3.8 Sistem özellikleri penceresi

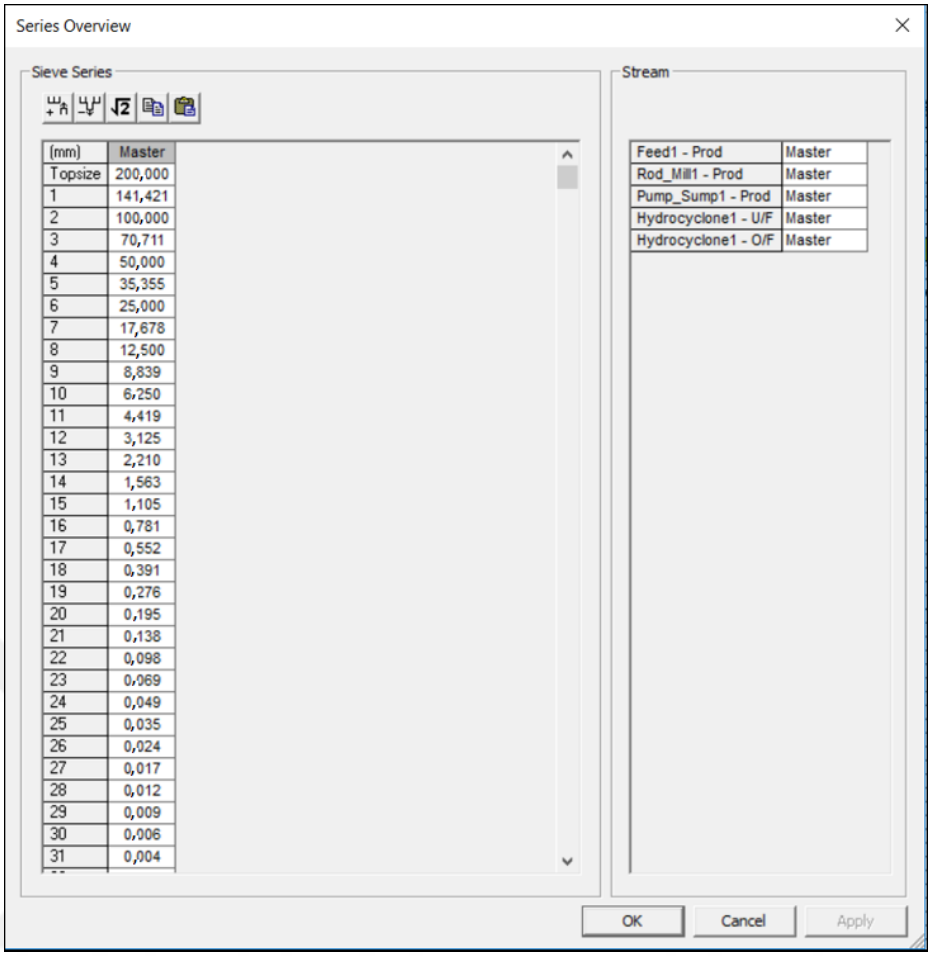
Sistem özellikleri; *Elementler* ve *Diğerleri* olarak ikiye ayrılmaktadır. Buradan *Diğerleri* seçilerek katının ve sıvının özgül ağırlıkları ayarlanabilmektedir. Bu kırma-ufalama devresinin modellenmesi için gerekmektedir.

Sonraki adım elek serisinin belirlenmesidir. “Flowsheet” menüsü açılarak buradan Şekil 3.9’daki gibi “Sieve Series” seçilir.



Şekil 3.9 Elek serisi penceresinin açılması

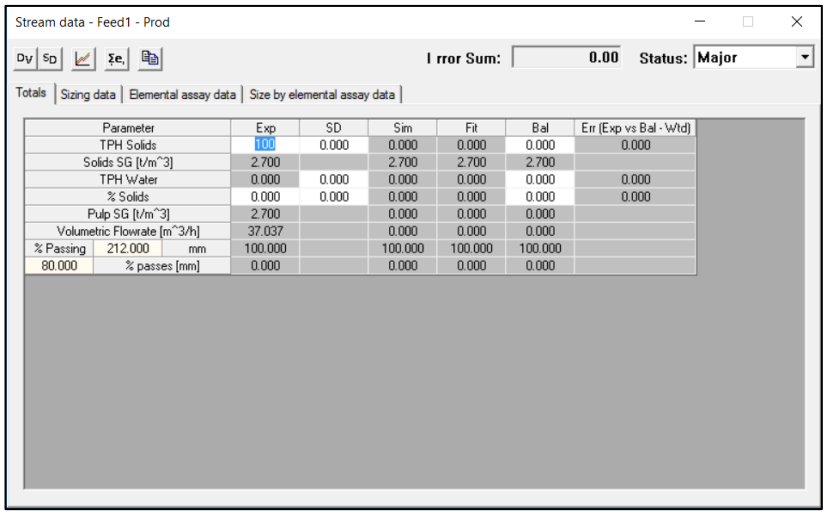
Elek serisi penceresinde varsayılan olarak “Master” elek serisi yer almaktadır (Şekil 3.10). Burada kullanıcı farklı bir elek serisi ekleme gereği duyuyorsa bu penceredeki araç butonlarını kullanarak elek serisi girebilir. Aynı zamanda sağ tarafta bulunan “Stream” panelinde akımların hangi elek serisini hangi akımda kullanılacağını seçilebilmektedir.



Şekil 3.10 Elek serisinin belirlenmesi

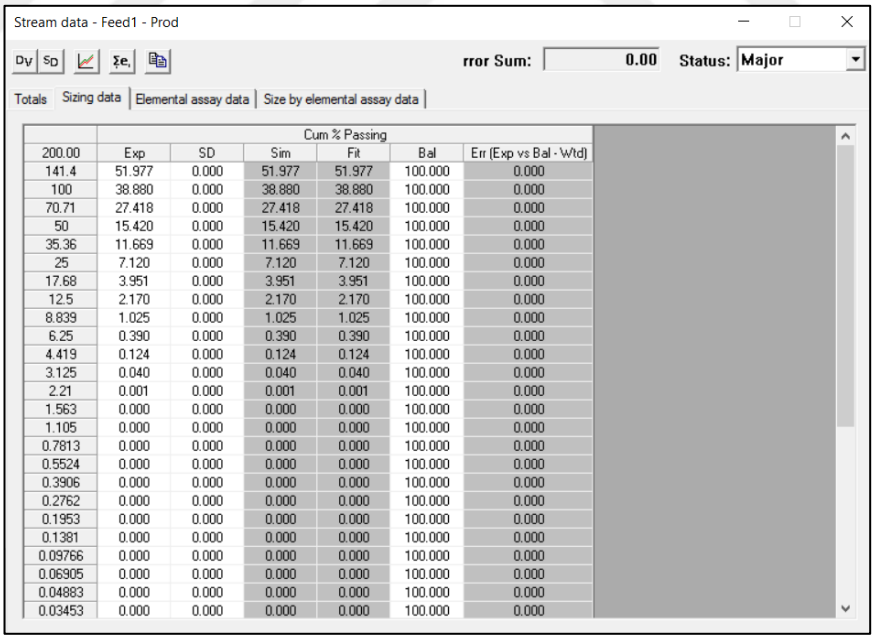
3.6.10 Ekipman Verileri

Akım şeması üzerinde besleyici çift tıklanarak açılan “Stream Data” penceresinde ekipmandan çıkan saatte malzeme miktarı ve su yüzdesi belirlenmektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Akım veri penceresi

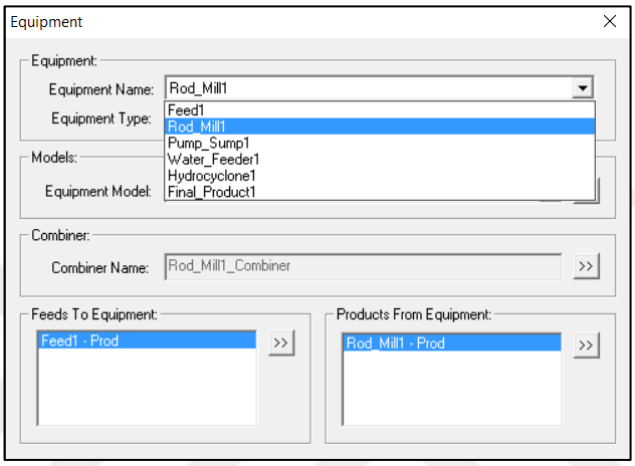
"Stream Data" penceresinde "Sizing data" sekmesi açıldığında fraksiyonlara göre malzeme yüzdesi girilebilmektedir (Şekil 3.12). Burada kullanıcı "Experimental" kolonunu dolduracaktır. Bu kolon dışındaki kolonların hepsinde ya sıfır yada yüz değeri yer almaktadır.



Şekil 3.12 Fraksiyon verileri sekmesi

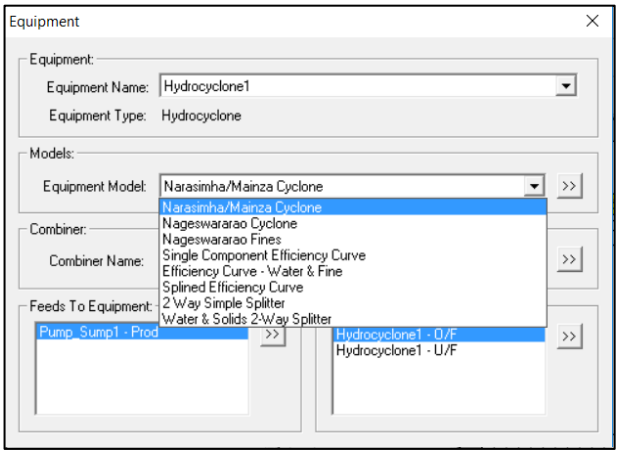
3.6.11 Ekipman Modelinin Seçilmesi

Sistem özellikleri ve besleyici akım verileri belirlendikten sonra her bir ekipman için model seçilmeli ve ilgili parametreler girilmelidir. Akım şemasındaki ekipman üzerine gidilerek farenin sol tuşuna çift tıklandığında ekipman penceresi açılacaktır. Burada Ekipman ismi bölümünden ayarlanacak ekipman seçilir (Şekil 3.13).



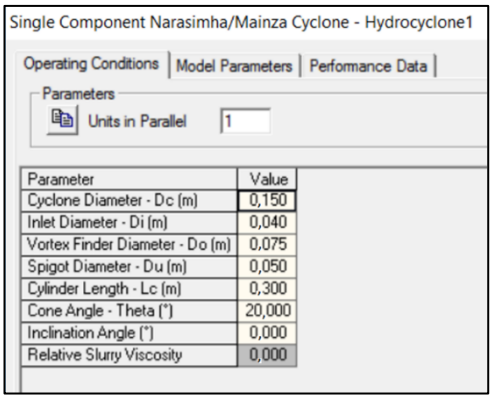
Şekil 3.13 Ekipman penceresi

Daha sonra seçilen ekipman için ekipman modeli bölümünden model seçilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Ekipman modelinin seçilmesi

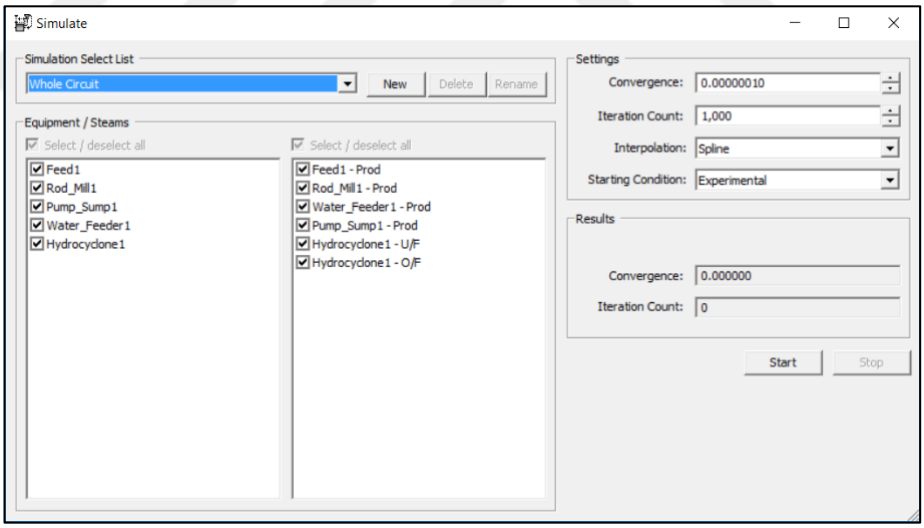
Ekipman Modeli seçildikten sonra Model panelinde bulunan sağa doğru çift ok butonu tıklanarak o ekipmana ait parametrelerin belirlendiği pencere açılır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Seçilen ekipman çalışma parametrelerinin belirlenmesi

3.6.12 Simülasyon

Artık akım şeması simülasyona hazır hale gelmiştir. Programın sol tarafında bulunan "" (Run simulation) simgesine basılarak "Simulate" penceresi açılır (Şekil 3.16).

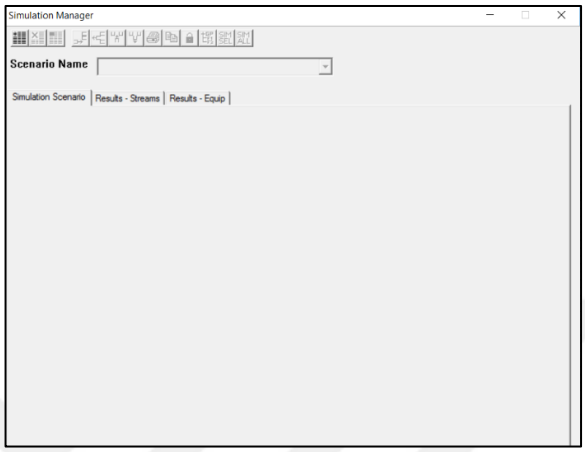


Şekil 3.16 Simülasyon penceresi

Simülasyon listesinde "Whole Circuit" varsayılan olarak seçili durumdadır. "Whole Circuit" akım şemasının tamamı simüle etmektedir. "New" butonuna basılarak yeni simülasyon eklenebilmektedir. Sol alt taraftaki iki panelden soldakinden simüle edilecek ekipmanlar, sağdakinden ekipmanların bağlı olduğu akımlar seçilmektedir. "Settings" (ayarlar) panelinde simülasyon ayarları yapılmaktadır.

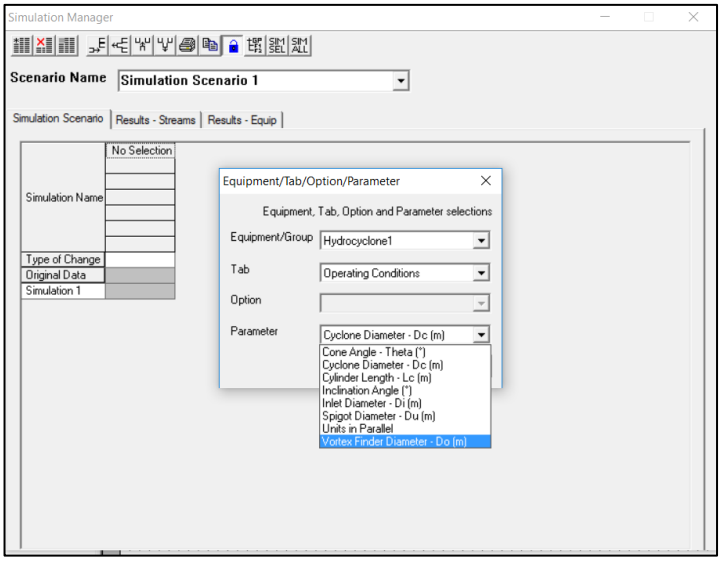
3.6.13 Simülasyon Menejeri

Araçlar menüsünden "Simulation Manager" butonuna basılarak simülasyon menajeri penceresi açılır (Şekil 3.17).



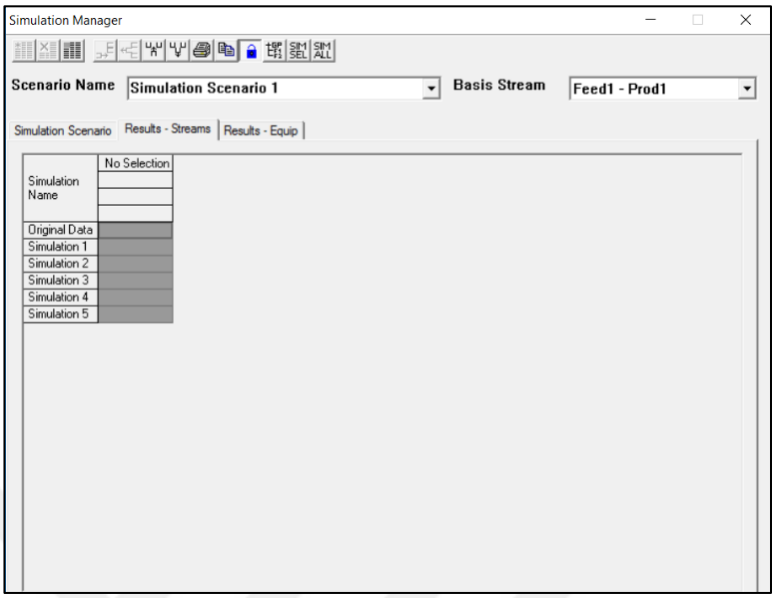
Şekil 3.17 Simülasyon menejeri penceresi

"New Sim Scenario" butonuna basılarak yeni simülasyon senaryosu eklenir. Burada örnek olarak hidrosiklon üst çıkış açıklığı değerlendirilecektir. Bunun için Şekil 3.18' de görüldüğü gibi ekipman grubu, çalışma şartları ve hidrosiklon üst çıkış açıklığı parametre olarak seçilmiştir.



Şekil 3.18 Simülasyon parametresinin seçilmesi

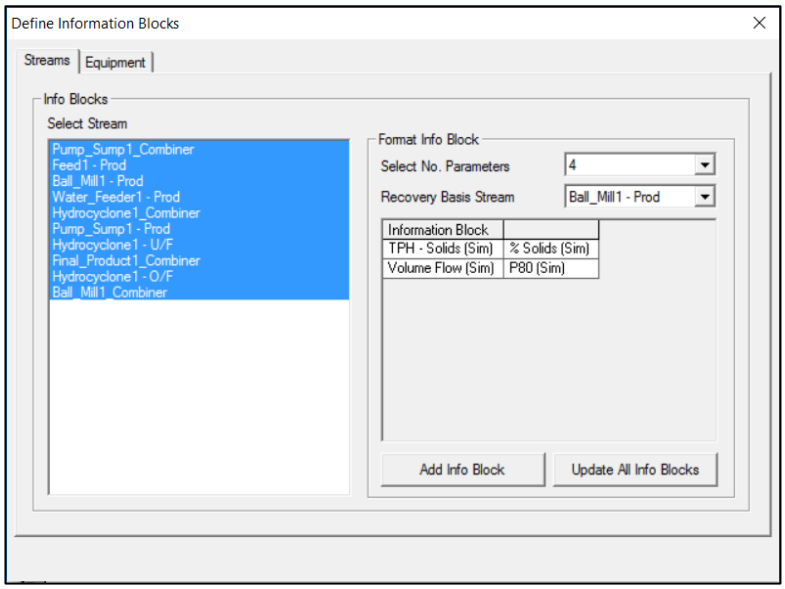
"Results Stream" sekmesinde oluşturulan simülasyon senaryolarının sonuçları izlenmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 result stream sekmesi

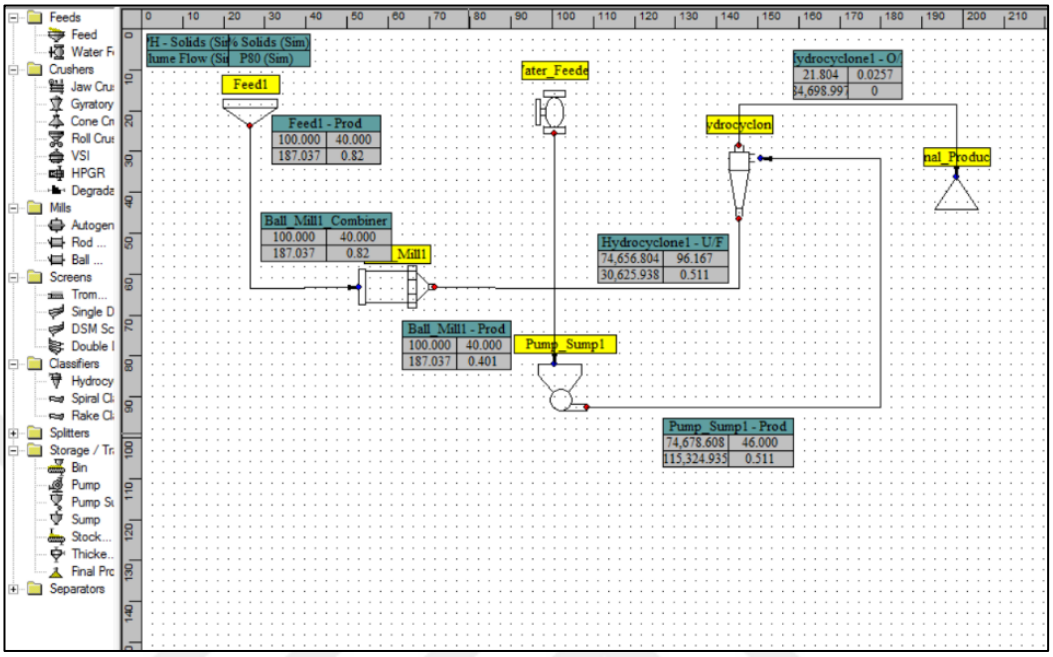
3.6.14 Bilgi Kutucuklarının Yerleştirilmesi

"Setup Info Block" butonuna basıldığında Şekil 3.20'deki pencere açılmaktadır. Bu pencereden parametre sayısı, parametre türleri seçilmektedir.



Şekil 3.20 Bilgi kutucuklarının seçilmesi

Bilgi kutucukları ayarlandıktan sonra "Add Info Block" butonuna basıldığında akım şemasında yer almaktadır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Akım şemasında bilgi kutucukları

BÖLÜM DÖRT
ÖRNEK BİR CEVHER HAZIRLAMA TESİSİ SİMÜLASYONU

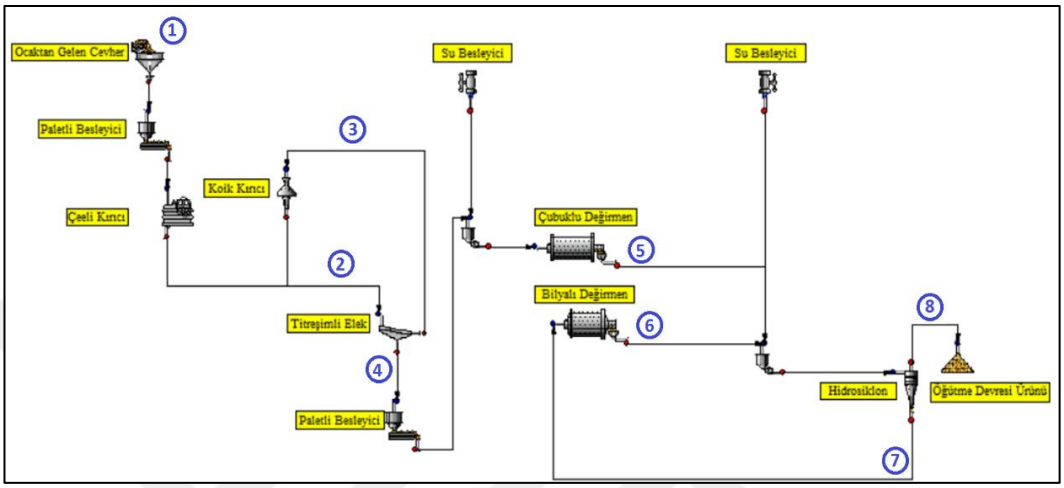
Bu bölümde altın zenginleştirme tesisinin Şekil 4.1'de verilen kırma-eleme, öğütme ve sınıflandırma devreleri simüle edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında JKSimMet paket programı kullanılmıştır. JKSimMet paket programda simülasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için tesisteki gerçek verilerin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla tesiste çalışmaları yapılıp önceden belirlenen noktalardan temsili numuneler alınarak laboratuvar ortamında veriler elde edilmiştir. Ayrıca tesisteki ekipmanlara ait çalışma parametreleri belirlenip simülasyon programında kullanılmıştır.

4.1 Numunelerin Temini

Simülasyon çalışmaları için numuneler Koza Altın İşletmeleri A.Ş.'nin İzmir ilinin kuzeyinde Bergama ilçesinde kalan Ovacık bölgesinde yer alan tesislerinden alınmıştır. Tesise beslenen çıkış açıklığı 90 mm olan çeneli kırıcıdan geçirilerek 2,4x6,1 m ebatlarındaki elek açıklığı 20 mm olan titreşimli eleğe beslenmektedir. Elek üstü malzeme çıkış açıklığı 20 mm olarak ayarlanmış konik kırıcıya beslenmektedir. Konik kırıcıdan çıkan malzeme çeneli kırıcı çıkışı ile birleşerek titreşimli eleğe beslenmektedir. Elek altı malzeme 2,7x3,9 m boyutlarında ki çubuklu değirmene beslenmektedir. Çubuklu değirmenden çıkan malzeme havuza verilmektedir. Malzeme bu havuzdan 250 mm'lik hidrosiklonlara basılmaktadır. Hidrosiklon alt çıkışından çıkan malzeme bilyalı değirmene beslenmektedir. Bilyalı değirmenden çıkan malzeme hidrosiklonlara basılmak üzere çubuklu değirmen ürünüyle aynı havuzda birleşmektedir.

Deneylerde kullanılan numuneler Şekil 4.1'de akım şemasında numaralar ile gösterilen noktalardan alınmıştır. Tablo 4.1'de alınan numuneler ve açıklamaları gösterilmiştir. 1 no'lu çeneli kırıcıya beslenen malzeme çok iri boyutta olduğu için yeteri kadar numune almak mümkün olmamıştır. Besleme malının elek altı eğrisinin belirlemede "Görüntü Analizi" yöntemi kullanılmıştır. Çeneli kırıcı çıkışı ile konik kırıcı çıkışı aynı bant üzerine oturmuş durumda olduğu için iş güvenliği sebeplerince

bu noktalardan numune alınamamıştır. Kırma devresinde numune alma işlemleri bant üzerinden periyodik aralıklarla dilimler şeklinde numune alarak yapılmıştır. Öğütme devresinde ise pülp halinde akan malzemeden periyodik aralıklarla akışkan haldeki ortamdan numune alınmıştır.



Şekil 4.1 JKSimMet paket programı ile çizilen kırma-öğütme tesisi akım şeması

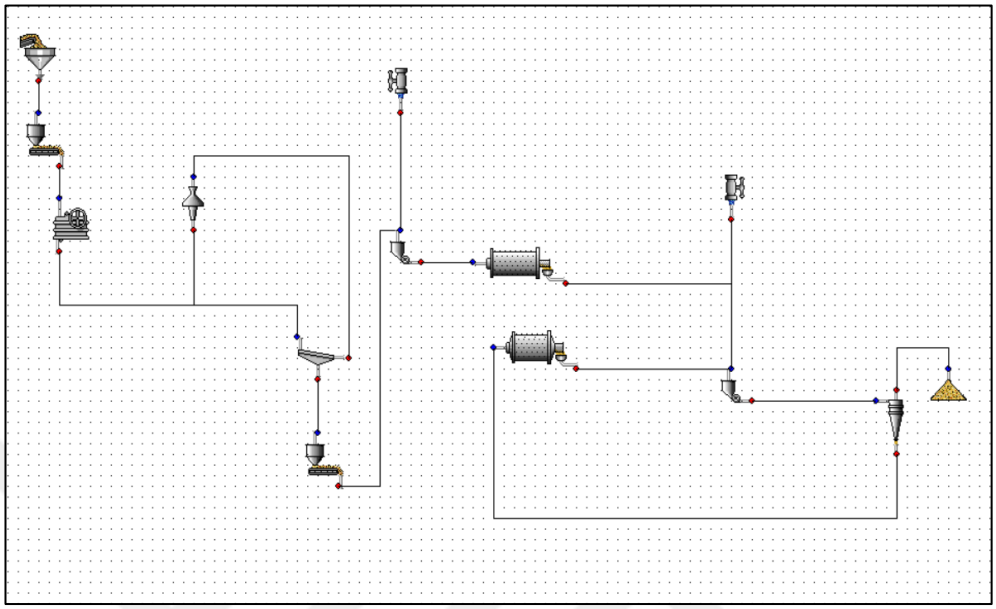
Tablo 4.1 Alınan numunelerin tanımı

Numune No	Tanımı
1	Besleme (Görüntü analizi)
2	Elek besleme
3	Elek üstü malzeme
4	Elek altı malzeme
5	Çubuklu değirmen ürünü
6	Bilyalı değirmen ürünü
7	Hidrosiklon alt akımı
8	Hidrosiklon üst akımı

4.2 Simülasyon Çalışmaları

Simülasyon çalışmalarına ilk olarak cevher hazırlama tesisinin akım şeması çizilerek başlanmıştır (Şekil 4.2). Tesiste yapılan çalışmalarla ekipmanlara ait çalışma parametreleri ve cevhere ait özellikler belirlenmiştir. Bu parametreler ve özellikler programa aktarılarak simülasyon yapılmıştır. Programın başarılı sonuç verdiğini doğrulamak amacıyla simülasyon sonuçları ile laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Kırma-eleme devresinde bulunan

çeneli kırıcı, konik kırıcı ve tek katlı eleğe ait parametreler Tablo 4.2, 4.3 ve 4.4'de yer almaktadır.



Şekil 4.2 Tesisin JKSimMet v6.02 paket programında akım şemasının çizilmesi

Tablo 4.2 Çeneli kırıcı ölçülen parametreler

Parametre	**Değer**
Kapalı Çıkış Açıklığı (mm)	90 mm
Yüksüz Ölçülen Gücü (kW)	15 kW/sa
Yüklü Ölçülen Gücü (kW)	85 kW/sa

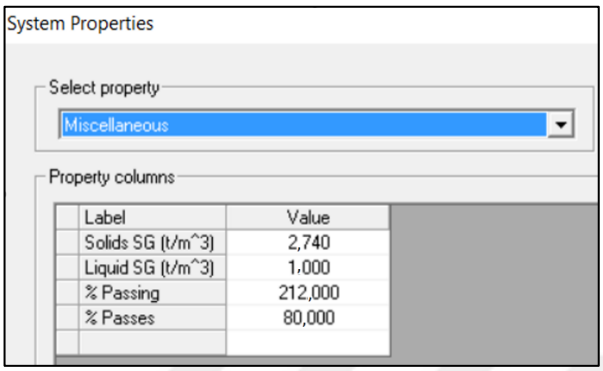
Tablo 4.3 Tek katlı elek parametreleri.

Parametre	**Değer**
Elek uzunluğu (m)	6,1 m
Elek genişliği (m)	2,4 m
Elek açıklığı (mm)	18 mm
Elek yüzeyi açıklık oranı (%)	% 45

Tablo 4.4 Konik kırıcı parametreleri

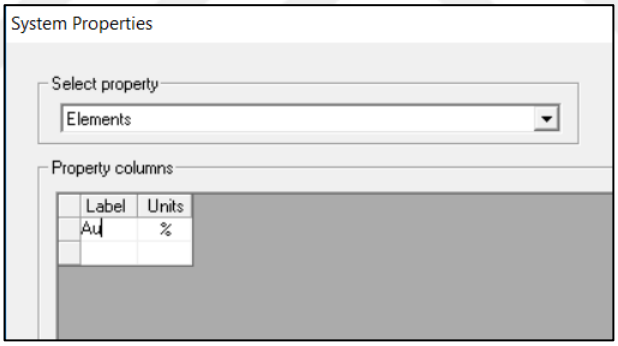
Paremetre	**Değer**
Kırıcı Çıkış Açıklığı (mm)	20 mm
Kırıcı Genliği (mm)	25 mm
Kırıcı Gücü (kW)	220 kW

JKSimMet v 6.0.1 paket programında sistem özellikleri sekmesinde bulunan diğerleri seçeneğinde katı malzemenin yoğunluğu 2,74 t /m^3, sıvının yoğunluğu 1 t/m^3 olarak ayarlanmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Sistem özelliklerinin girilişi

Sistem özelliklerinden yer alan elementler seçeneğinden çalışılan cevher altın olarak belirtilmiştir (Şekil 4.4).



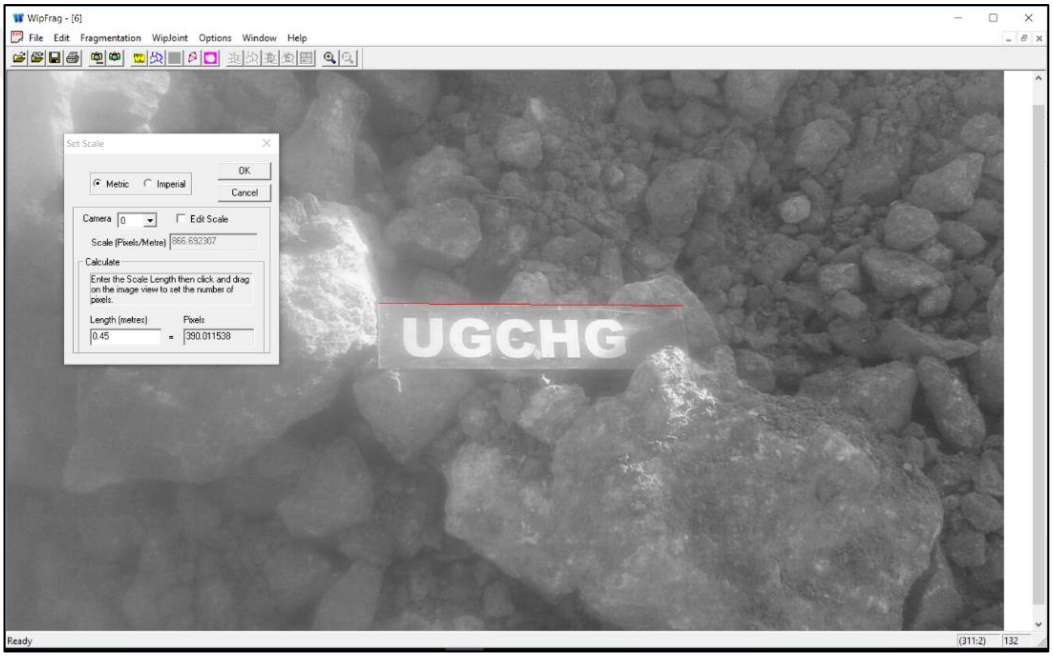
Şekil 4.4 Sistem özelliklerinden çalışılan cevherin belirlenmesi

4.2.1 Görüntü Analizi Tekniği ile Tesise Beslenen Cevherin Kümülatif Elekaltı Eğrisinin Belirlenmesi

Çeneli Kırıcıya beslenen malzeme çok iri boyuttadır. Bu malzemenin tane boyut dağılımını elek analizi yöntemiyle belirlemek için yığından çok büyük miktarda numune alınması gerekmektedir. Laboratuvar imkanları ile bu çalışmayı yapılması mümkün olmadığı için çeneli kırıcıya beslenen malzemenin tane boyut analizini tayin

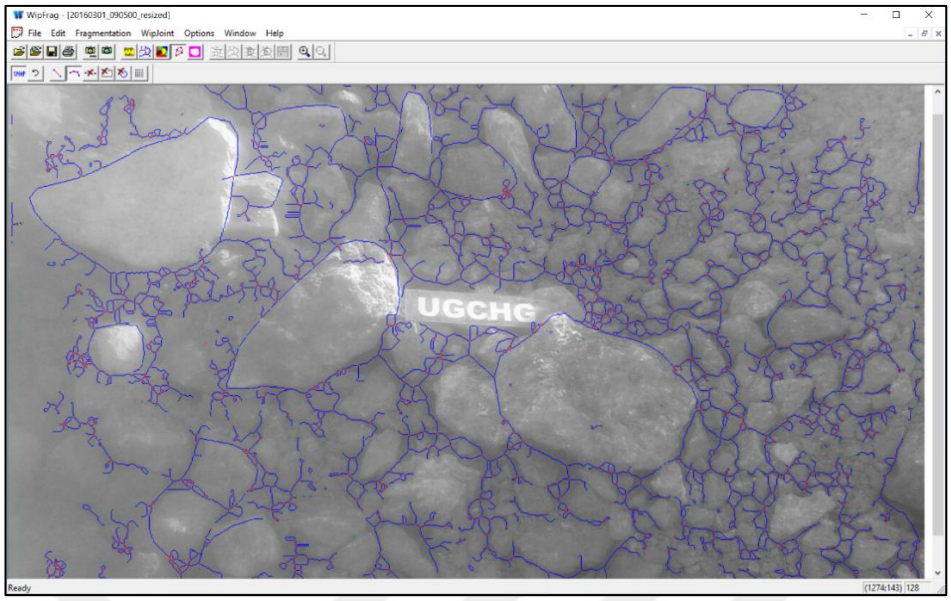
etmek için görüntü analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında WipWare şirketinin geliştirdiği WipFrag v.2.6 yazılımı kullanılmıştır.

Görüntü analizinde yığının değişik bölgelerinden 6 adet resmi çekilmiştir. Resimlerde ölçek olarak kullanılmak üzere boyutları 45 x 10 cm olan bir levha yer almaktadır. Resim WipFrag v.2.6 yazılımına aktarıldıktan sonra ölçek programa tanıtılmıştır (Şekil 4.5). Program bu ölçeğe göre yığındaki taneleri belirleyip (Şekil 4.6) boyutlarını hesaplamaktadır. Sonuçlarını grafik şeklinde çıktı olarak vermektedir (Şekil 4.8).



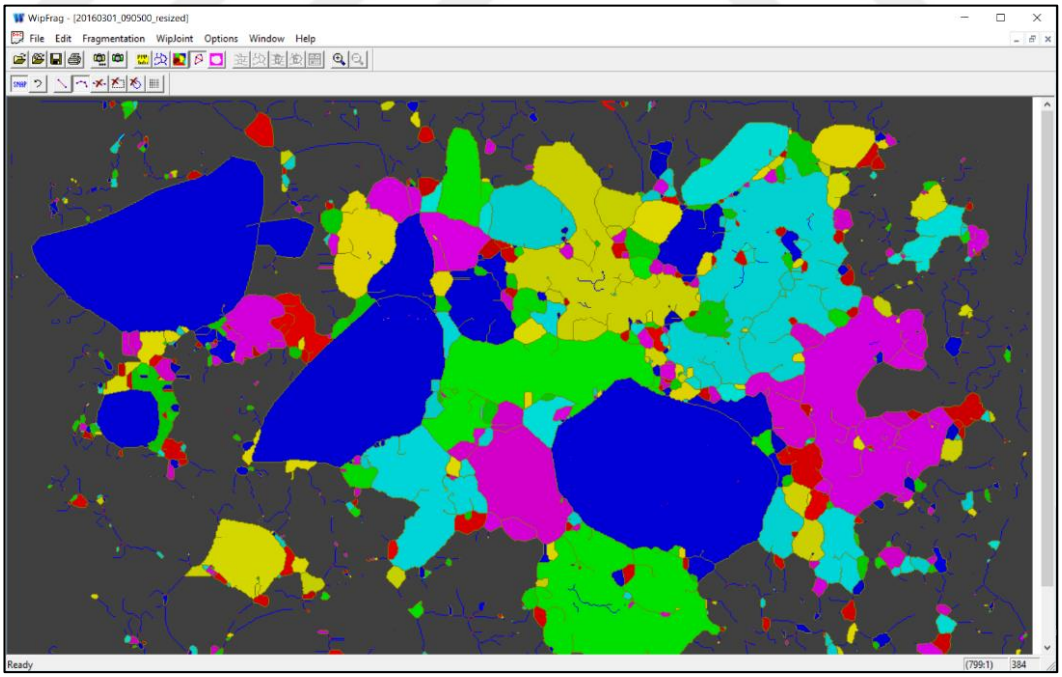
Şekil 4.5 WipFrag v 2.6 programına ölçeğin girilişi

Programda resim ölçeği belirlendikten sonra "Generate Net" butonuna basılarak tanelerin sınırları belirlenir. Burada resim karesinde alt alta bulunan taneleri birmiş gibi kabul etmesine dikkat edilir. Gerekirse manuel olarak tane sınırları belirlenmelidir (Şekil 4.6).



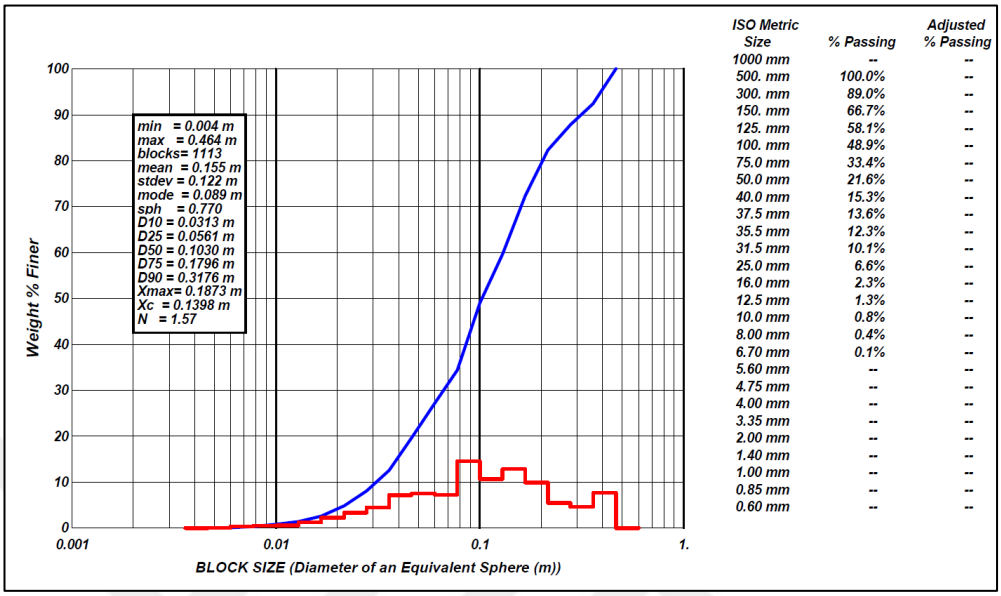
Şekil 4.6 WipFrag v 2.6 programının taneleri belirlemesi

Şekil 4.7' de programın taneleri alansal olarak hesapladığı görülmektedir. WipFrag v 2.6 boyutsal olarak tane büyüklüklerini belirleyerek fraksiyon yüzdelerini hesaplamaktadır.



Şekil 4.7 WipFrag v 2.6 programın tanelerin boyutunu belirlemesi

Bütün hesaplamaları yaptıktan sonra WipFrag v2.6 yazılımı sonucu elek altı eğrisi şeklinde grafik olarak vermektedir. Şekil 4.8'deki grafik için D_{90} değeri 0,3176 m'dir.



Şekil 4.8 WipFrag v 2.6 programının verildiği elek altı eğrisi

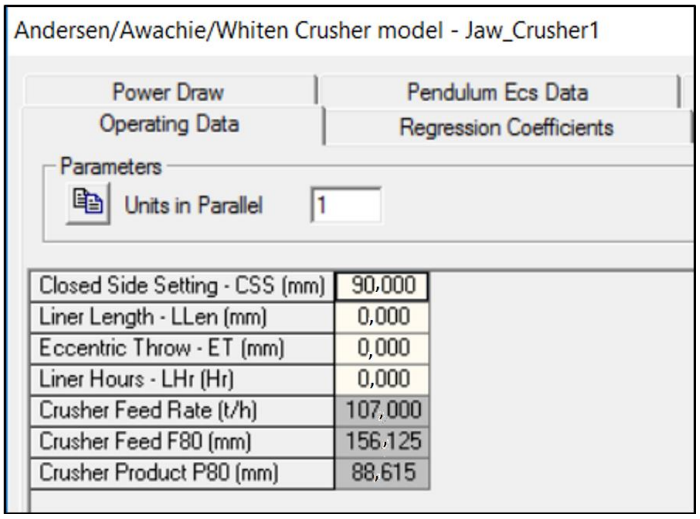
WipFrag v 2.6 yazılımı ile yapılan görüntü analizleri sonucu yığının kümülatif elek altı değerleri belirlenmiştir (Tablo 4.5). Bu değerlere göre ortalama olarak yığının %80'i 310 mm'nin altındadır.

Tablo 4.5 Yığının görüntü analizi ile kümülatif elek altı değerleri ve ortalaması.

Tane Boyutu, mm	∑EA %						
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**ORT**
1000	100	100	100	100	100	100	100
500	100	100	82,3	100	100	88,1	95,07
300	90,6	100	76,7	89	58,5	57,2	78,67
150	66	72,4	45,7	66,7	46,6	26,8	54,03
125	55,2	64,7	40,1	58,1	45,9	22,7	47,78
100	45,3	47,1	31,7	48,9	41,5	18,8	38,88
75	32,8	43,3	23,4	33,4	34,1	13,5	30,08
50	18,7	28,8	14,4	21,6	2	7	15,42
40	14,2	23,3	10,4	15,3	14,4	4,6	13,70
37,5	13,1	22,5	9,3	13,6	13,2	3,9	12,60
35,5	12,2	21,8	8,5	12,3	12,2	3,4	11,73
31,5	10,3	20	6,8	10,1	10,6	2,6	10,07
25	7,3	15,7	4,1	6,6	7,6	1,4	7,12
16	3,7	8,8	1,4	2,3	3,4	0,4	3,33
12,5	2,2	6,6	0,8	1,3	2	0,1	2,17
10	1,3	4,6	0,4	0,8	1	0	1,35
8	0,8	2,9	0,2	0,4	0,6	0	0,82
6,7	0,5	1,9	0	0,1	0,4	0	0,48
5,6	0,3	1,2	0	0	0,2	0	0,28
4,75	0,1	0,8	0	0	0,1	0	0,17
4	0	0,5	0	0	0	0	0,08
3,35	0	0,3	0	0	0	0	0,05
2	0	0	0	0	0	0	0
1,4	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
0,85	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0	0	0

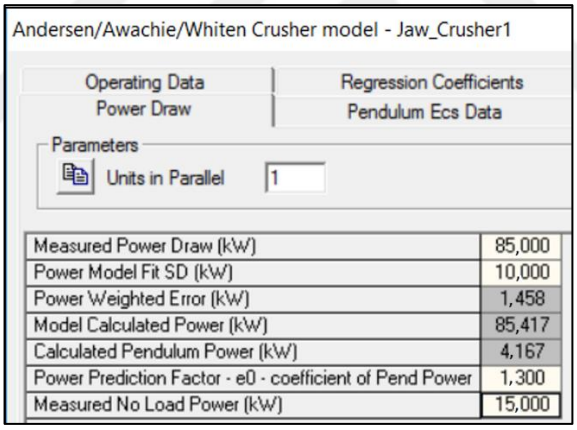
Buraya kadar yapılan çalışmalarda kırma eleme devresi simülsyonu için gerekli veriler hazırlanmıştır. Simülasyon için gerekli veriler JKSimMet v 6.0.1 paket programına girilerek kırma eleme devresi simülasyonu yapılmıştır.

Çeneli Kırıcı kapalı durumdaki çıkış açıklığı 280 mm olarak JKSimMet v 6.0.1 programına girilmiştir (Şekil 4.9).



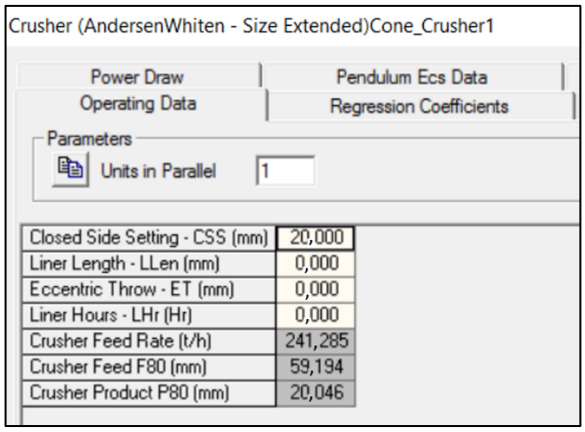
Şekil 4.9 Çeneli kırıcı kapalı çıkış açıklığı değerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Çeneli Kırıcı yüklü halde ve boş haldeki gücü 85 kW ve 15 kW olarak programa girilmiştir (Şekil 4.10).



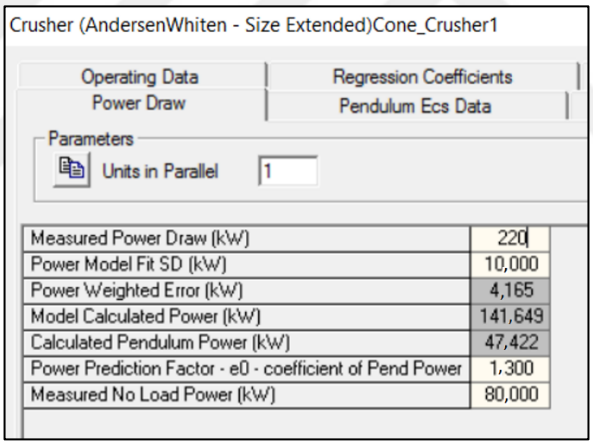
Şekil 4.10 Çeneli kırıcı güç değerlerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Konik Kırıcı kapalı konumdaki çıkış açıklığı 20 mm olarak programa girilmiştir (Şekil 4.11).



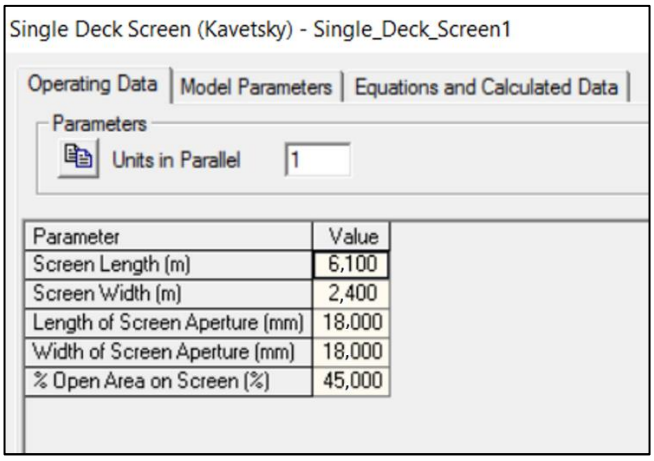
Şekil 4.11 Konik kırıcı kapalı konumdaki çıkış açıklığı değerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Konik Kırıcı güç değeri 220 kW olarak JKSimMet paket programa girilmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12 Konik kırıcı gücünün JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Tek katlı elek parametreleri elek boyutu 2,4 x 6,1 elek açıklığı 18 mm ve açıklık oranı % 45 olarak JKSimMet v 6.0.1 paket programa girilmiştir (Şekil 4.13).



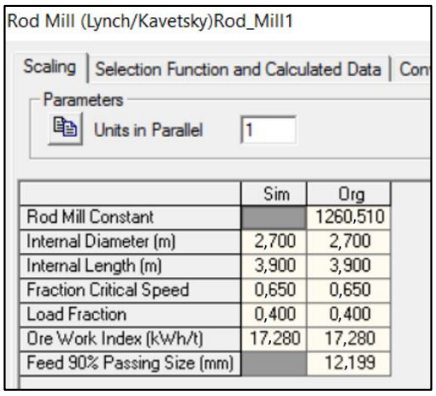
Şekil 4.13 Tek katlı elek parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Çubuklu değirmen parametreleri Tablo 4.6'de gösterilmiştir. Bu parametreler tesisten alınmıştır. Cevher İş Endeksi tesisten alınan numunelerle Bond Değirmeni ile yapılan deneyler sonucu bulunmuştur.

Tablo 4.6 Çubuklu değirmen çalışma parametreleri

Özellik	**Değer**
Çap (m)	2,7 m
Boy (m)	3,9 m
Güç kW	315 kW
Kritik hız	0,65
Cevher İş Endeksi (kWsa/ton)	17,28 kWsa/ton

Bu değerler JKSimMet v 6.0.1 paket programında açılan çubuklu değirmen ekipman özellikleri bölümüne girilmiştir (Şekil 4.12). Ayrıca burada yaş öğütme yapılmaktadır. Tesisten numune alındığı andaki değirmen katı oranı % 78'dir. Akım şemasında değirmene su besleyici eklenmiştir.

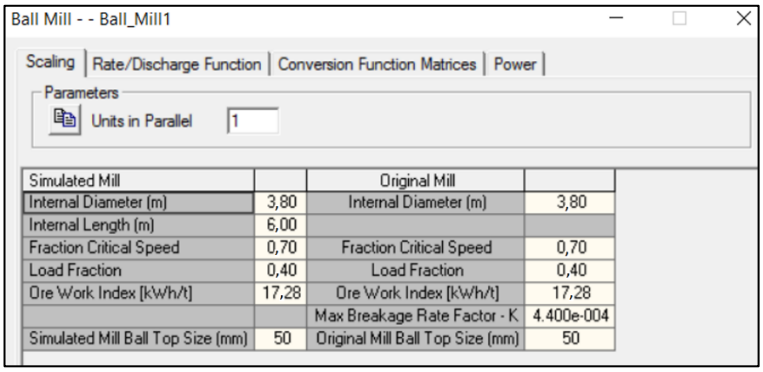


Şekil 4.12 Çubuklu değirmen parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Tesiste bilyalı değirmen parametreleri Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Bu parametreler Şekil 4.13'de gösterildiği gibi paket programa girilmiştir.

Tablo 4.7 Bilyalı değirmen çalışma parametreleri.

Parametre	**Değer**
Boy	6 m
Çap	3,8 m
Bilya çapı	50 mm
Kritik Hız (%)	% 70
Besleme oranı (%)	%40
Cevher İş Endeksi	17,28 kWsa/ton
Değirmen Gücü	1305 kW



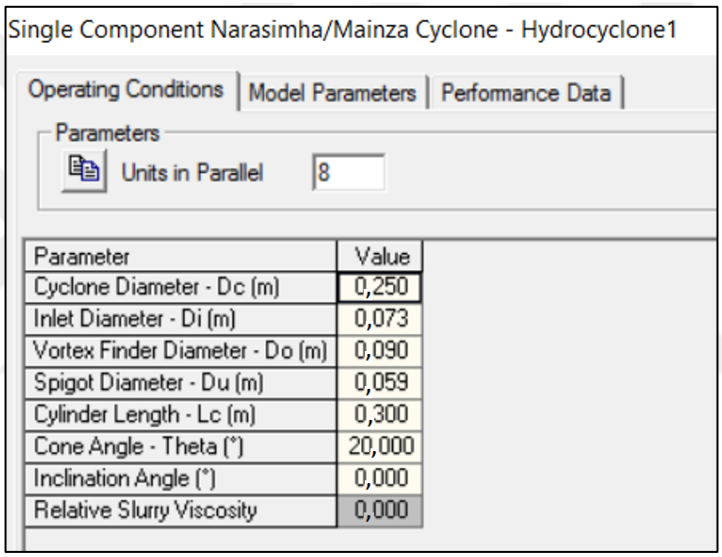
Şekil 4.13 Bilyalı değirmen parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Değirmen parametreleri belirlendikten sonra, hidrosiklon batarya özellikleri programa girilmiştir. Hidrosiklon çalışma parametreleri Tablo 4.8'de gösterilmiştir. Bu değerlerin paket programa girilişi de Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Tesiste yapılan çalışmalar sonucu hidrosiklona beslenen malzemenin katı oranı % 65, Üst akımdan

çıkan malzemenin katı oranı %37, bilyalı değirmene devreden yük miktarı 790 t/sa, katı oranı %78 olduğu tespit edilmiştir.

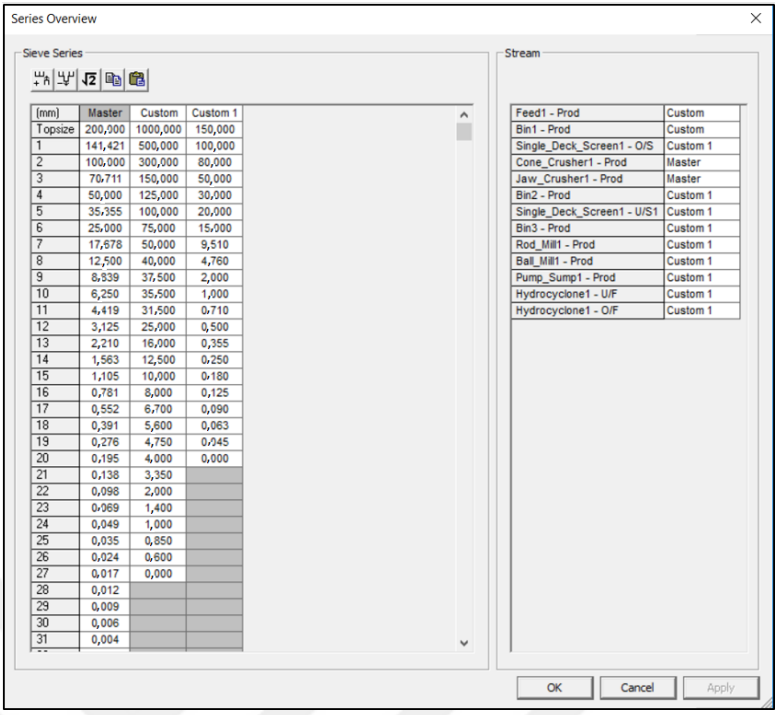
Tablo 4.8 Hidrosiklon parametreleri.

Parametre	**Değer**
Çap (mm)	250 mm
Giriş Çapı (mm)	73 mm
Üst çıkış (mm)	90 mm
Alt çıkış (mm)	59 mm
Adet	8 (7+1)
Çalışma Basıncı kPa	100 kPa



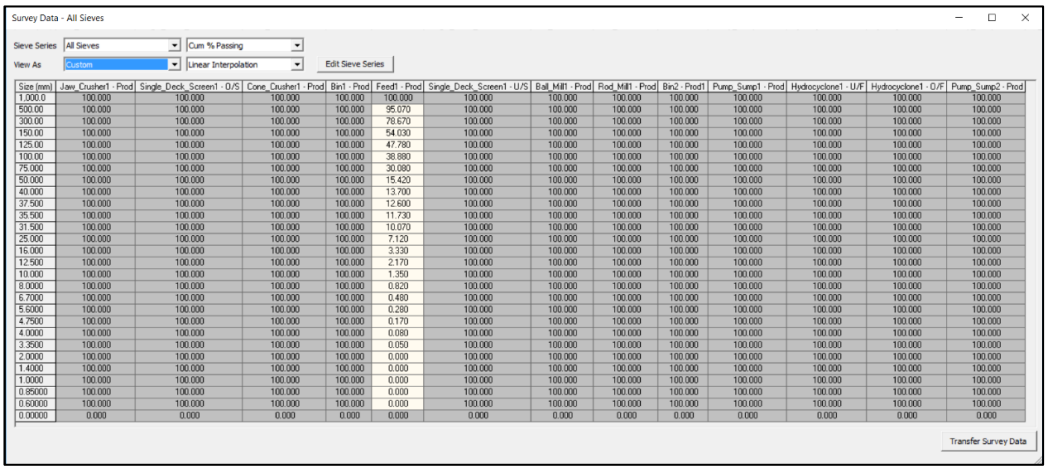
Şekil 4.14 Hidrosiklon çalışma parametrelerinin JKSimMet v 6.0.2 paket programa girilişi

Programın elek serileri Görüntü Analizinde kullanılan WipFrag v2.6 programının verdiği elek serisi "Custom" elek analizi deneyinde kullanılan elek serisi "Custom 1" olarak programa tanıtılmıştır (Şekil 4.15). Akım şemasında yer alan besleyici ve silo için "Custom" değerleri, tek katlı elek üst akım ve alt akım ve silo 2 için "Custom 1" serisi kullanılmıştır. Konik kırıcı ürünü ve çeneli kırıcı ürünü akımlarından tesiste numune almak mümkün olmadığı için deney yapılamamış ve bu ürünler için programın kendi alt yapısında yer alan Master elek serisi kullanılmıştır.



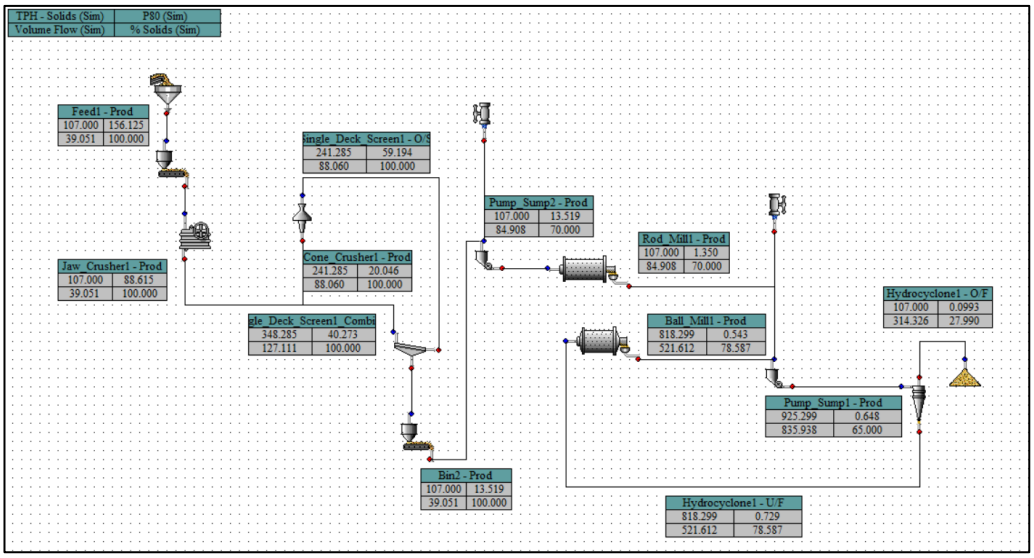
Şekil 4.15 Elek serilerinin JKSimMet v 6.0.1 paket programına girilişi

Tesis besleme malı için görüntü analizi yoluyla elde edilen kümülatif elek altı değerleri için Tablo 4.5'deki ortalama değerler olarak girilmiştir (Şekil 4.16).



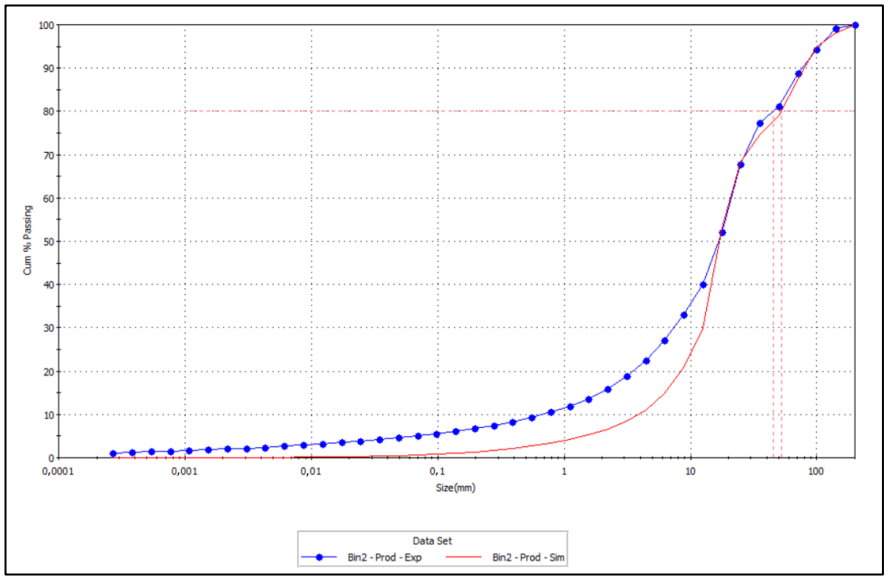
Şekil 4.16 Besleyici elek altı değerlerinin JKSimMet v 6.0.1 paket programına girilişi

Simülasyon için gerekli olan parametreler programa girildikten sonra simülasyon gerçekleştirilmiştir. Akım şeması üzerinde verilerin daha rahat incelenebilmesi için bilgi kutucukları eklenmiştir (Şekil 4.17).



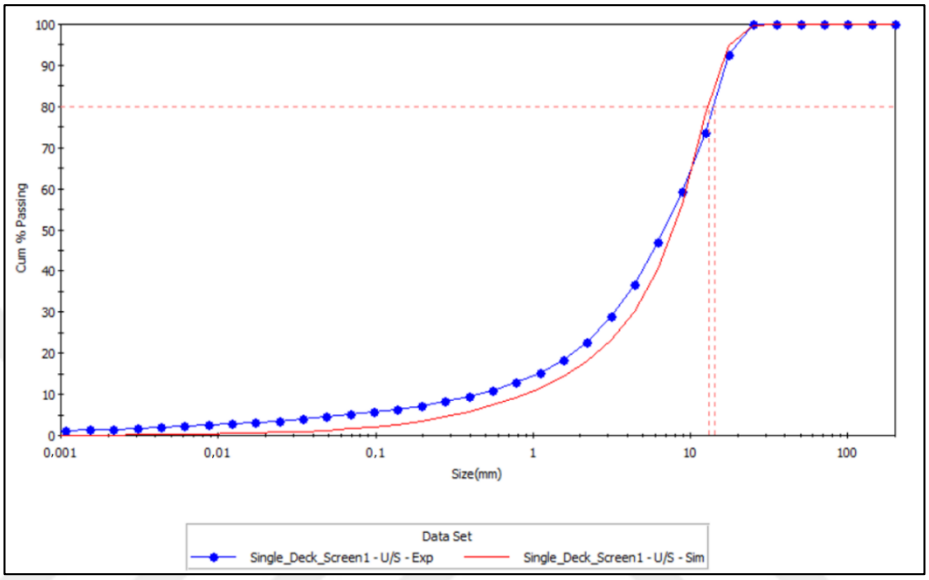
Şekil 4.17 Tesisin akım şeması çizilerek simüle edilmiştir

Tesiste kırıcılardan çıkan malzemelerden ayrı arı numune alınamamıştır. Ancak eleğe besleme yapan banttan numune alınmıştır ve elek besleme malının elek analizi yapılmıştır. Laboratuvar sonucu elde edilen verilerle çizilen ve simülasyon sonucu elde edilen verilere göre çizilen kümülatif elek altı eğrileri Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Bu eğriden besleme malının %80'inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık olarak 47 mm olduğu görülmektedir. Simülasyon sonucu ise elek besleme malının %80 inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık olarak 40 mm olduğu görülmektedir.



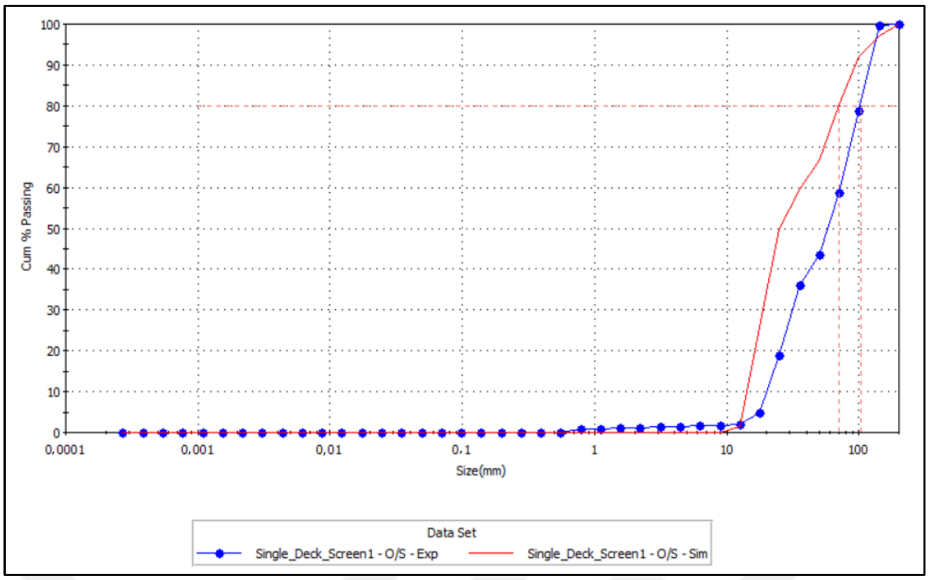
Şekil 4.18 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu eleğe beslenen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Elek altına geçen malzemenin laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elde edilen kümülatif elek altı eğrisi Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bu şekildeki eğriden elek altına geçen malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık olarak 14 mm civarında olduğu görülmektedir. Simülasyon sonucu ise bu değerin 13 mm civarında olduğu eğriden görülebilmektedir.



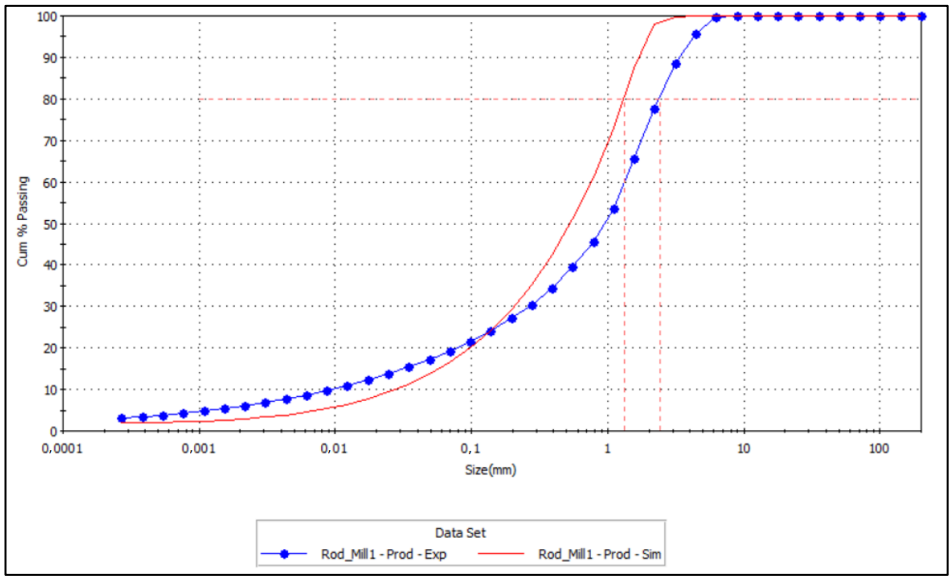
Şekil 4.19 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elek altına geçen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Elek üstü malzemenin laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elde edilen verilerle çizilen kümülatif elek altı eğrisi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekilden elek üstü malzemenin %80 inin geçtiği elek açıklığı 100 mm olarak görülmektedir. Simülasyon sonucuna göre ise %80 inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık 70 mm olarak görülmektedir.



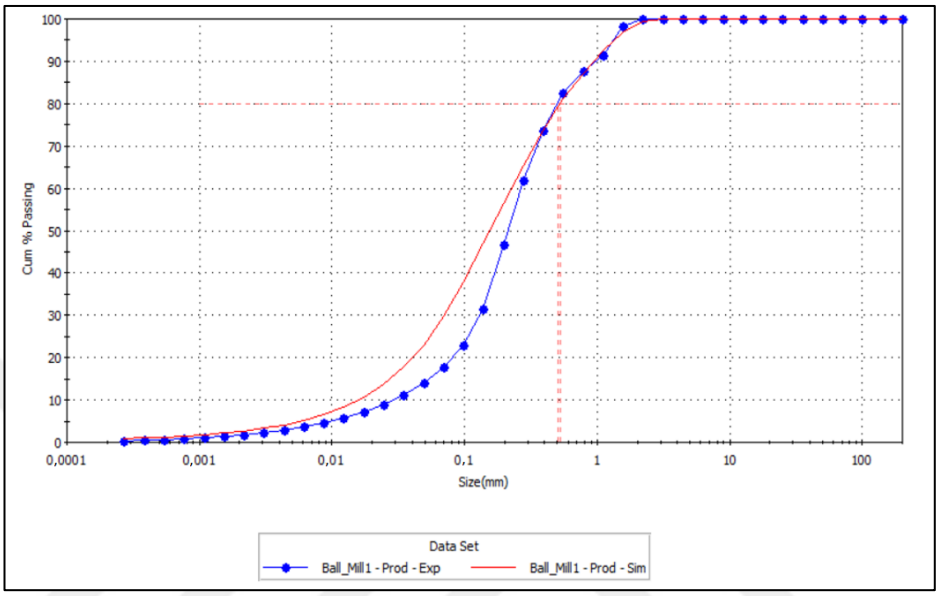
Şekil 4.20 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elek üstü malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Çubuklu değirmenden çıkan malzemenin laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elde edilen verilere göre kümülatif elek altı eğriler çizildiğinde malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı 2,5 mm olduğu görülmektedir (Şekil 4.21). Simülasyon sonucuna göre de bu boyutun 1,3 mm civarında olduğu görülebilmektedir.



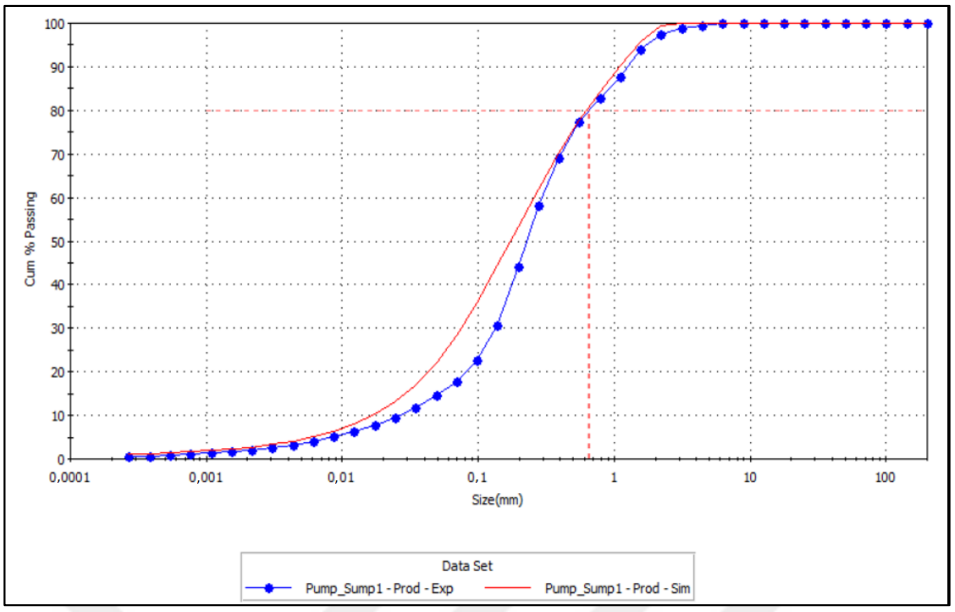
Şekil 4.21 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu çubuklu değirmenden çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Bilyalı değirmenden çıkan malzemenin laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elde edilen verilere göre kümülatif elek altı eğriler çizildiğinde malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı 500 µm olduğu görülmektedir (Şekil 4.22). Simülasyon sonucuna göre de bu boyutun 500 µm olduğu görülebilmektedir.



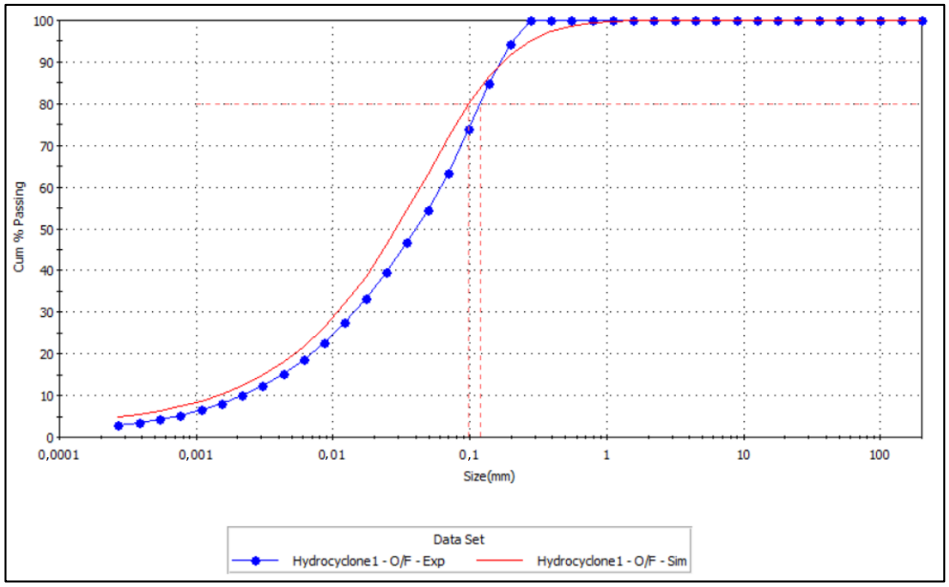
Şekil 4.22 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu bilyalı değirmenden çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Hidrosiklona beslenen malzemenin laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu elde edilen verilere göre kümülatif elek altı eğriler çizildiğinde malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı 650 µm olduğu görülmektedir (Şekil 4.23). Simülasyon sonucuna göre de bu boyutun aynı olduğu görülebilmektedir.



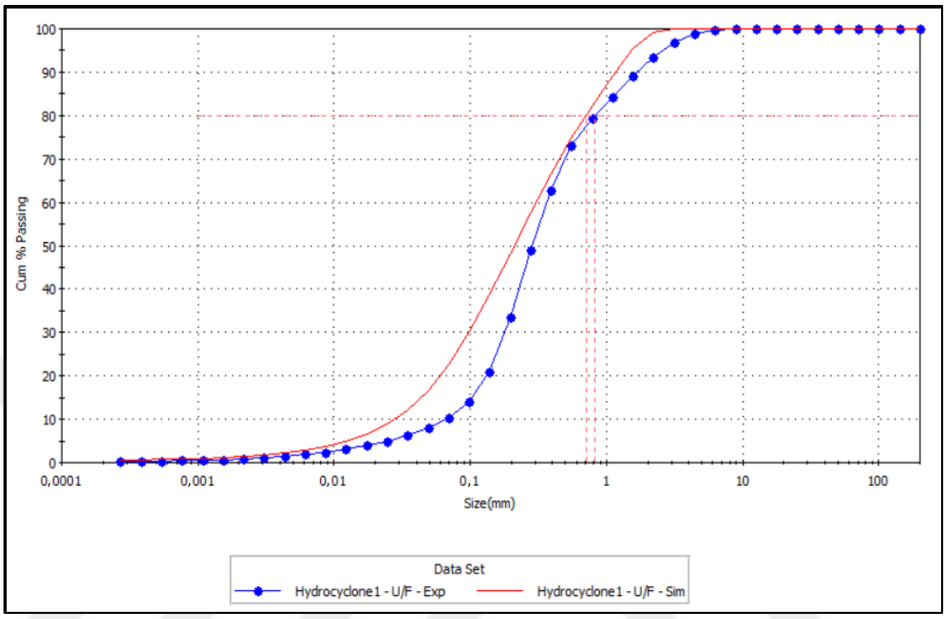
Şekil 4.23 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklona beslenen malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Hidrosiklon üst akımının kümülatif elek altı eğrisi deney verilerine göre çizildiğinde malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık olarak 120 µm civarı olduğu görülmektedir. Simülasyon sonucuna göre de bu boyutun 100 µm civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Hidrosiklon alt akımının elek altı eğrisi deney verilerine göre çizildiğinde malzemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı yaklaşık olarak 800 µm civarı olduğu görülmektedir. Simülasyon sonucuna göre de bu boyutun 700 µm civarında olduğu görülmektedir (Şekil4.25).



Şekil 4.25 Laboratuvar deneyleri sonucu ve simülasyon sonucu hidrosiklon alt akımından çıkan malzemenin kümülatif elek altı eğrisi

Yapılan simülasyon sonucunda programın kümülatif elekaltı eğrilerini çizerken kullandığı tahmini hidrosiklon elek altı verileri Tablo 4.9'da gösterilmiştir. Bu verilere göre hidrosiklon ayırma performansının belirlenmesi için tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi çizilmiştir (Şekil 4.26).

Düzeltilmiş ayırma oranları aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır;

$$\mathrm{Yd} = \frac{Yg - Rs}{1 - Rs} \tag{4.1}$$

Formülde Rs simgesi siklon alt akımındaki su miktarının siklon besleme malındaki su miktarına oranını gösterir. Mevcut akım şemasında siklon besleme malındaki su miktarı 415,47 t/sa, alt akımındaki su miktarı 201,86 t/sa'dir. Buradan Rs değeri 0,045

olarak elde edilmiştir. Her bir fraksiyon için Y_d değerleri ayrı ayrı hesaplanarak tabloya yerleştirilmiştir.

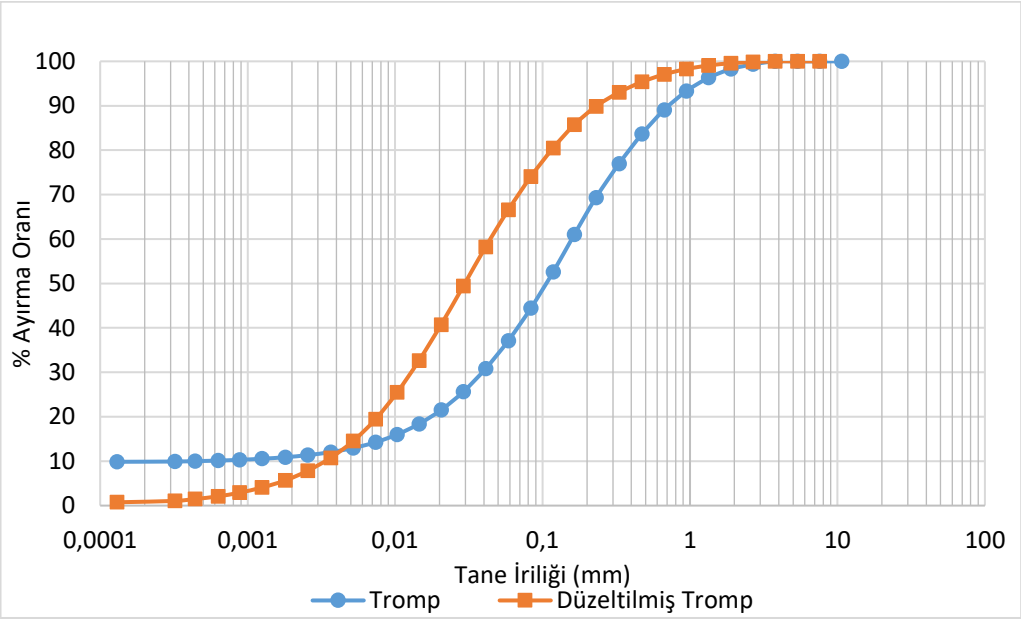
Tablo 4.9 Simülasyon sonucu 250mm'lik hidrosiklon ürünleri fraksiyon yüzdeleri

Tane Boyu (mm)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort. Tane İriliği	Ayırma Oranı	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım			Y_G	Y_D
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,7840		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	10,6695	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,01	100,00	0,00	100,00	0,01	100,00	0,00	0,01	0,01	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,04	99,99	0,00	100,00	0,05	99,99	0,00	0,04	0,04	5,3345	100,00	100,00
4,419 - 3,125	0,23	99,94	0,00	100,00	0,26	99,93	0,00	0,23	0,23	3,7720	100,00	100,00
3,125 - 2,210	1,41	99,71	0,01	100,00	1,61	99,67	0,00	1,41	1,41	2,6675	99,91	99,83
2,210 - 1,563	5,45	98,31	0,10	99,99	6,22	98,06	0,01	5,43	5,45	1,8865	99,76	99,57
1,563 - 1,105	5,65	92,86	0,23	99,89	6,43	91,84	0,03	5,62	5,65	1,3340	99,48	99,07
1,105 - 0,781	6,03	87,21	0,46	99,65	6,84	85,41	0,06	5,97	6,03	0,9432	99,03	98,26
0,781 - 0,552	6,59	81,18	0,85	99,19	7,43	78,57	0,11	6,49	6,59	0,6669	98,37	97,07
0,552 - 0,390	7,27	74,59	1,48	98,34	8,11	71,15	0,19	7,08	7,27	0,4715	97,42	95,37
0,390 - 0,270	7,94	67,31	2,44	96,86	8,74	63,03	0,31	7,63	7,94	0,3303	96,11	93,02
0,270 - 0,190	8,42	59,37	3,76	94,42	9,09	54,29	0,48	7,94	8,42	0,2300	94,35	89,86
0,190 - 0,138	8,49	50,95	5,33	90,66	8,94	45,20	0,67	7,81	8,49	0,1641	92,05	85,72
0,138 - 0,970	8,04	42,47	6,91	85,33	8,20	36,26	0,87	7,16	8,04	0,1179	89,12	80,47
0,097 - 0,069	7,11	34,43	8,13	78,42	6,97	28,06	1,03	6,09	7,11	0,0833	85,55	74,04
0,069 - 0,048	5,93	27,32	8,73	70,29	5,52	21,09	1,10	4,82	5,93	0,0585	81,36	66,53
0,048 - 0,034	4,72	21,39	8,69	61,56	4,15	15,57	1,10	3,62	4,72	0,0410	76,71	58,17
0,034 - 0,024	3,66	16,67	8,15	52,87	3,01	11,43	1,03	2,63	3,66	0,0290	71,83	49,40
0,024 - 0,017	2,80	13,01	7,31	44,72	2,15	8,42	0,92	1,88	2,80	0,0205	66,99	40,72
0,017 - 0,012	2,14	10,21	6,36	37,41	1,53	6,27	0,80	1,34	2,14	0,0145	62,48	32,61
0,012 - 0,008	1,65	8,06	5,41	31,06	1,10	4,73	0,68	0,96	1,65	0,0103	58,49	25,45
0,008 - 0,006	1,27	6,42	4,52	25,65	0,80	3,63	0,57	0,70	1,27	0,0074	55,13	19,41
0,006 - 0,004	0,99	5,14	3,72	21,13	0,59	2,83	0,47	0,52	0,99	0,0052	52,42	14,54
0,004 - 0,003	0,77	4,15	3,03	17,41	0,44	2,23	0,38	0,39	0,77	0,0037	50,30	10,73
0,003 - 0,002	0,60	3,38	2,45	14,38	0,34	1,79	0,31	0,29	0,60	0,0026	48,68	7,83
0,002 - 0,0015	0,47	2,78	1,96	11,93	0,26	1,45	0,25	0,22	0,47	0,0018	47,48	5,66
0,0015 - 0,0010	0,37	2,31	1,57	9,97	0,20	1,20	0,20	0,17	0,37	0,0013	46,59	4,07
0,0010 - 0,0008	0,29	1,94	1,24	8,40	0,15	1,00	0,16	0,13	0,29	0,0009	45,95	2,91
0,0008 - 0,0005	0,23	1,64	0,97	7,16	0,12	0,85	0,12	0,10	0,23	0,0006	45,48	2,08
0,0005 - 0,0004	0,17	1,42	0,75	6,19	0,09	0,73	0,09	0,08	0,17	0,0004	45,15	1,48
0,0004 - 0,0003	0,13	1,25	0,57	5,44	0,07	0,64	0,07	0,06	0,13	0,0003	44,91	1,05
0,0003 - 0,0000	1,11	1,11	4,87	4,87	0,57	0,57	0,62	0,50	1,11	0,0001	44,74	0,74

Aşağıdaki eşitlikten imperfection (I) değerleri hesaplanmıştır.

$$\iota = (d_{75} - d_{25})/(2* d_{50}) \qquad (4.2)$$

250 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden d_{75}'değeri 320 µm, d_{25} değeri 29 µm, d_{50} değeri de 110 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26 250 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

Hidrosiklon performansının daha iyi değerlendirilmesi amacıyla düzeltilmiş performans eğrisi çizilerek imperfection değeri hesaplanmıştır.

Düzeltilmiş tromp eğrisi incelendiğinde d_{75} değeri 84 µm, d_{25} değeri 10 µm, d_{50} değeri 30 µm olarak belirlenmiştir. Formülden imperfection değeri 1,23 olarak bulunmuştur.

Daha iyi bir ayırma verimi elde etmek amacıyla farklı boyutlarda hidrosiklonlar ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

4.3 Farklı Model Hidrosiklonların Denenmesi

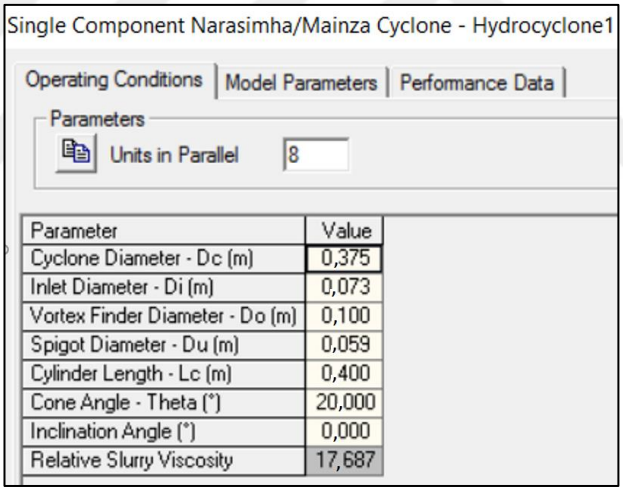
Daha iyi ayırma verimi yakalamak amacıyla piyasadaki kolayca bulunabilen hidrosiklon çaplarına uygun olan 375 mm, 450 mm, 600 mm'lik hidrosiklonlar simüle edilmiştir. Hidrosiklonların özellikleri Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

Tablo 4.10 Simüle edilen hidrosiklonların çalışma parametreleri

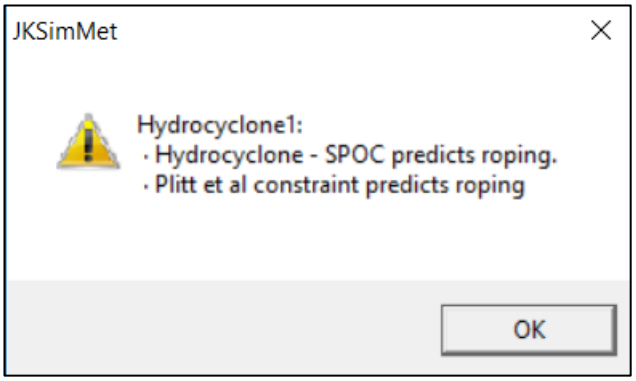
Hidrosiklon	**Mevcut model**	**Simüle edilen modeller**				
Çapı	250	375	375	450	450	600
Giriş açıklığı (mm)	73	73	110	100	120	190
Üst çıkış açıklığı (mm)	90	100	190	150	210	240
Alt çıkış açıklığı (mm)	59	59	80	59	90	130
Silindirik gövde uzunluğu (mm)	300	400	550	400	600	650
Adet	8	8	6	5	5	3

4.3.1 375 mm Çapında Hidrosiklon

Çapı 250 mm olan hidrosiklonun çalışma parametreleri sabit tutularak çapı 375 mm yapılmıştır (Şekil 4.27). 375 mm'lik hidrosiklonla simülasyon gerçekleştirildiğinde program hata vermiştir (Şekil 4.28).

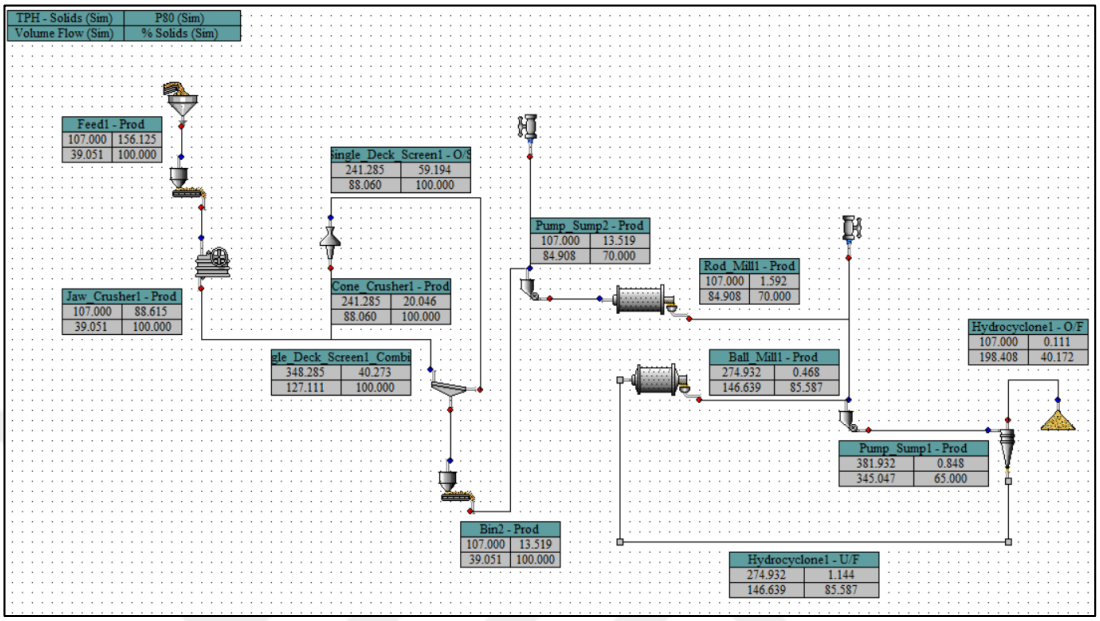


Şekil 4.27 Hidrosikolon çapının değiştirilmesi



Şekil 4.28 375 mm çaplı hidrosiklon hatası

Simülasyon sonucu akım şeması incelendiğinde devreden yük 274 t/sa, hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P_{80} değeri 111 µm olduğu görülmektedir (Şekil 4.29).



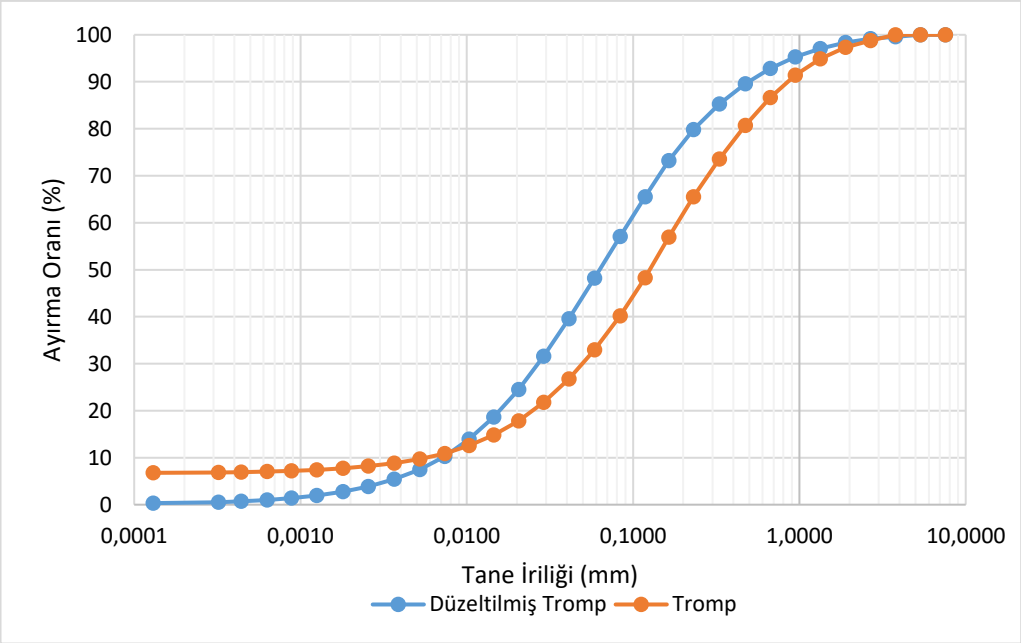
Şekil 4.29 Hidrosiklon çapı 375 mm diğer çalışma parametreleri sabit bırakıldığında simülasyon sonucu akım şeması

Simülasyon sonucu program hidrosiklon besleme malı, üst akım ve alt akıma ait kümülatif elek altı verileri oluşturmuştur (Tablo 4.11). Elde edilen bu verilere göre tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrileri çizilmiştir (Şekil 4.30). 250 mm çaplı hidrosiklon tromp eğrisi ile göre 375 mm'lik hidrosiklonun tromp eğrisi arasında fark oluşmamıştır.

Tablo 4.11 Diğer çalışma parametreleri sabit tutularak çapı 375 mm olarak ayarlanan hidrosiklon ürünleri kümülatif elek altı verileri.

Tane Boyu (mikron)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort, Tane İriliği	AYIRMA ORANI	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım				
	%		%		%		%	%	%	mikron		
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,7840		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	10,6695	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,01	100,00	0,00	100,00	0,02	100,00	0,00	0,01	0,01	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,06	99,98	0,00	100,00	0,08	99,98	0,00	0,06	0,06	5,3345	100,00	100,00
4,419 - 3,125	0,30	99,92	0,00	100,00	0,42	99,89	0,00	0,30	0,30	3,7720	99,69	99,59
3,125 - 2,210	1,81	99,62	0,04	100,00	2,50	99,48	0,01	1,80	1,81	2,6675	99,33	99,13
2,210 - 1,563	6,77	97,81	0,32	99,95	9,28	96,97	0,09	6,68	6,77	1,8865	98,69	98,31
1,563 - 1,105	6,38	91,04	0,52	99,64	8,66	87,70	0,14	6,24	6,38	1,3340	97,74	97,08
1,105 - 0,781	6,20	84,66	0,80	99,12	8,30	79,03	0,23	5,98	6,20	0,9432	96,37	95,31
0,781 - 0,552	6,21	78,46	1,23	98,32	8,15	70,73	0,34	5,87	6,21	0,6669	94,47	92,86
0,552 - 0,390	6,35	72,25	1,83	97,09	8,11	62,58	0,51	5,84	6,35	0,4715	91,91	89,56
0,390 - 0,270	6,56	65,90	2,67	95,26	8,07	54,47	0,75	5,81	6,56	0,3303	88,58	85,26
0,270 - 0,190	6,71	59,34	3,75	92,58	7,86	46,40	1,05	5,66	6,71	0,2300	84,36	79,81
0,190 - 0,138	6,71	52,63	4,98	88,84	7,39	38,54	1,39	5,32	6,71	0,1641	79,24	73,20
0,138 - 0,970	6,50	45,92	6,19	83,86	6,61	31,15	1,74	4,76	6,50	0,1179	73,28	65,51
0,097 - 0,069	6,04	39,42	7,18	77,67	5,60	24,54	2,01	4,03	6,04	0,0833	66,72	57,04
0,069 - 0,048	5,42	33,38	7,76	70,49	4,51	18,93	2,17	3,24	5,42	0,0585	59,88	48,21
0,048 - 0,034	4,71	27,96	7,87	62,73	3,48	14,43	2,21	2,51	4,71	0,0410	53,18	39,56
0,034 - 0,024	4,01	23,25	7,59	54,85	2,62	10,95	2,13	1,88	4,01	0,0290	46,97	31,55
0,024 - 0,017	3,37	19,24	7,02	47,26	1,94	8,33	1,97	1,40	3,37	0,0205	41,53	24,52
0,017 - 0,012	2,80	15,87	6,30	40,24	1,44	6,39	1,76	1,04	2,80	0,0145	36,97	18,64
0,012 - 0,008	2,32	13,07	5,51	33,94	1,07	4,95	1,54	0,77	2,32	0,0103	33,32	13,92
0,008 - 0,006	1,90	10,76	4,72	28,43	0,81	3,88	1,32	0,58	1,90	0,0074	30,47	10,25
0,006 - 0,004	1,56	8,85	3,99	23,71	0,61	3,07	1,12	0,44	1,56	0,0052	28,31	7,46
0,004 - 0,003	1,27	7,30	3,31	19,72	0,47	2,46	0,93	0,34	1,27	0,0037	26,70	5,38
0,003 - 0,002	1,02	6,03	2,72	16,41	0,36	1,99	0,76	0,26	1,02	0,0026	25,52	3,86
0,002 - 0,0015	0,83	5,01	2,22	13,68	0,28	1,63	0,62	0,20	0,83	0,0018	24,66	2,75
0,0015 - 0,0010	0,67	4,18	1,80	11,46	0,22	1,35	0,51	0,16	0,67	0,0013	24,05	1,96
0,0010 - 0,0008	0,53	3,51	1,45	9,66	0,17	1,12	0,41	0,13	0,53	0,0009	23,60	1,38
0,0008 - 0,0005	0,42	2,98	1,16	8,21	0,14	0,95	0,32	0,10	0,42	0,0006	23,29	0,98
0,0005 - 0,0004	0,33	2,56	0,91	7,05	0,11	0,81	0,25	0,08	0,33	0,0004	23,06	0,68
0,0004 - 0,0003	0,26	2,23	0,70	6,14	0,08	0,71	0,20	0,06	0,26	0,0003	22,90	0,48
0,0003 - 0,0000	1,97	1,97	5,44	5,44	0,63	0,63	1,52	0,45	1,97	0,0001	22,79	0,33

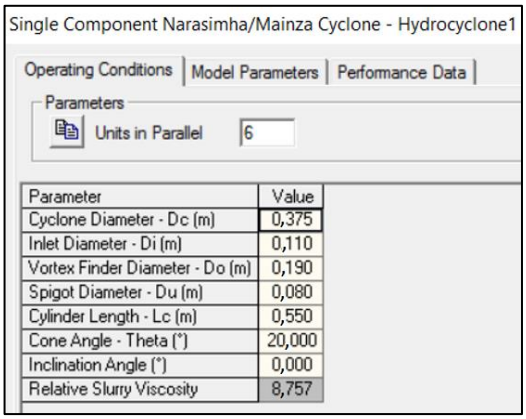
375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden d_{75}'değeri 340 µm, d_{25} değeri 39 µm, d_{50} değeri de 113 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.30 Hata veren 375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

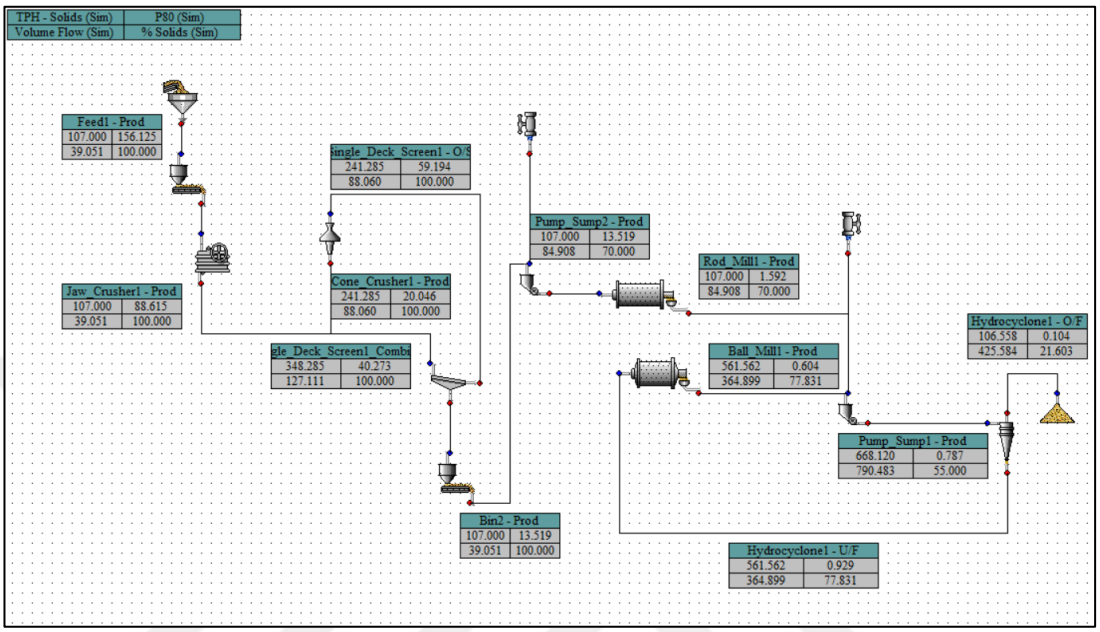
375 mm çapa sahip hidrosiklonun düzeltilmiş tromp eğrisinden yola çıkarak "imperfection" değeri 1,19 olarak bulunmuştur.

Çapı 375 mm olan hidrosiklonun diğer çalışma parametreleri değiştirilerek giriş açıklığı 110 mm, üst çıkış açıklığı 190 mm, alt çıkış açıklığı 80 mm silindir uzunluğu 550 mm ve bu siklondan 6 adet olması durumu değerlendirilmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 375 mm çapı olan hidrosiklon parametrelerinin değiştirilmesi

Hidrosiklon parametreleri girilip simülasyon gerçekleştirildiğinde hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P_{80} değeri 104 µm olmaktadır. Sistemin devreden yükü 561,56 t/saat olmaktadır (Şekil 4.32).



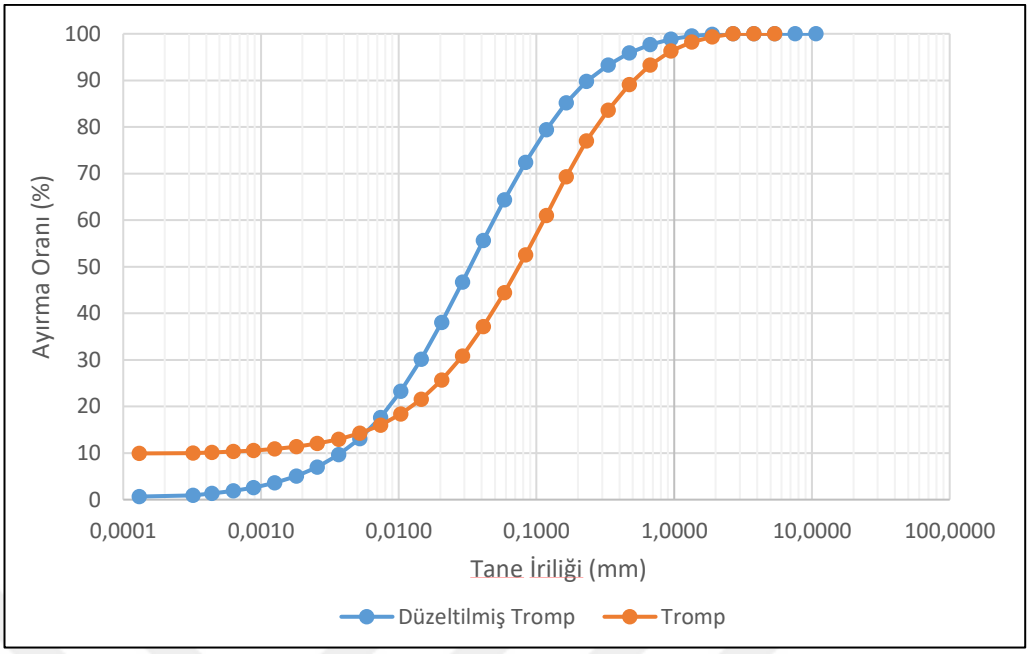
Şekil 4.32 6 adet 375 mm çaplı hidrosiklon kullanılması durumunda akım şeması

Simülasyon sonucu 375 mm'lik hidrosiklona ait elde edilen besleme, üst akım ve alt akıma ait kümülatif elek altı verileri Tablo 4.12'de verilmiştir. Bu verilerle çizilen 375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrileri Şekil 4.33'de verilmiştir.

Tablo 4.12 375 mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu elde edilen ait kümülatif elek altı verileri

Tane Boyu (mikron)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort, Tane İriliği	AYIRMA ORANI	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım				
	%		%		%		%	%	%	mikron		
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,7840		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	10,6695	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,01	100,00	0,00	100,00	0,01	100,00	0,00	0,01	0,01	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,05	99,99	0,00	100,00	0,06	99,98	0,00	0,05	0,05	5,3345	100,00	100,00
4,419 - 3,125	0,25	99,94	0,00	100,00	0,30	99,93	0,00	0,25	0,25	3,7720	100,00	100,00
3,125 - 2,210	1,54	99,69	0,00	100,00	1,83	99,63	0,00	1,54	1,54	2,6675	99,98	99,97
2,210 - 1,563	5,92	98,15	0,04	100,00	7,03	97,80	0,01	5,91	5,92	1,8865	99,90	99,86
1,563 - 1,105	6,03	92,23	0,13	99,96	7,15	90,77	0,02	6,01	6,03	1,3340	99,67	99,53
1,105 - 0,781	6,34	86,20	0,32	99,84	7,49	83,62	0,05	6,29	6,34	0,9432	99,18	98,85
0,781 - 0,552	6,84	79,86	0,71	99,51	8,01	76,13	0,11	6,73	6,84	0,6669	98,35	97,67
0,552 - 0,390	7,46	73,02	1,37	98,80	8,62	68,12	0,22	7,24	7,46	0,4715	97,08	95,87
0,390 - 0,270	8,06	65,56	2,40	97,44	9,13	59,51	0,38	7,67	8,06	0,3303	95,25	93,29
0,270 - 0,190	8,43	57,50	3,82	95,04	9,30	50,38	0,61	7,82	8,43	0,2300	92,77	89,78
0,190 - 0,138	8,38	49,07	5,51	91,22	8,93	41,08	0,88	7,50	8,38	0,1641	89,51	85,17
0,138 - 0,970	7,82	40,69	7,15	85,71	7,95	32,15	1,14	6,68	7,82	0,1179	85,41	79,38
0,097 - 0,069	6,83	32,87	8,36	78,55	6,54	24,20	1,33	5,50	6,83	0,0833	80,47	72,39
0,069 - 0,048	5,63	26,04	8,91	70,19	5,01	17,67	1,42	4,21	5,63	0,0585	74,79	64,36
0,048 - 0,034	4,46	20,41	8,78	61,28	3,64	12,65	1,40	3,06	4,46	0,0410	68,61	55,62
0,034 - 0,024	3,45	15,95	8,17	52,50	2,56	9,01	1,30	2,15	3,45	0,0290	62,27	46,66
0,024 - 0,017	2,65	12,50	7,29	44,33	1,77	6,45	1,16	1,49	2,65	0,0205	56,14	38,00
0,017 - 0,012	2,04	9,84	6,32	37,04	1,23	4,68	1,01	1,03	2,04	0,0145	50,55	30,10
0,012 - 0,008	1,58	7,80	5,36	30,72	0,86	3,46	0,86	0,72	1,58	0,0103	45,71	23,26
0,008 - 0,006	1,22	6,23	4,47	25,36	0,61	2,60	0,71	0,51	1,22	0,0074	41,71	17,60
0,006 - 0,004	0,96	5,00	3,68	20,89	0,44	1,99	0,59	0,37	0,96	0,0052	38,53	13,10
0,004 - 0,003	0,75	4,05	2,99	17,20	0,32	1,55	0,48	0,27	0,75	0,0037	36,06	9,62
0,003 - 0,002	0,59	3,30	2,41	14,21	0,24	1,23	0,39	0,20	0,59	0,0026	34,21	6,99
0,002 - 0,0015	0,46	2,72	1,93	11,80	0,18	1,00	0,31	0,15	0,46	0,0018	32,83	5,04
0,0015 - 0,0010	0,36	2,26	1,54	9,86	0,14	0,82	0,25	0,11	0,36	0,0013	31,82	3,62
0,0010 - 0,0008	0,28	1,90	1,22	8,32	0,10	0,68	0,19	0,09	0,28	0,0009	31,09	2,58
0,0008 - 0,0005	0,22	1,61	0,96	7,10	0,08	0,57	0,15	0,07	0,22	0,0006	30,56	1,84
0,0005 - 0,0004	0,17	1,39	0,74	6,14	0,06	0,49	0,12	0,05	0,17	0,0004	30,19	1,31
0,0004 - 0,0003	0,13	1,23	0,56	5,40	0,05	0,43	0,09	0,04	0,13	0,0003	29,92	0,93
0,0003 - 0,0000	1,10	1,10	4,84	4,84	0,39	0,39	0,77	0,33	1,10	0,0001	29,73	0,66

375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden (Şekil 4.33) d_{75}'değeri 300 µm, d_{25} değeri 39 µm, d_{50} değeri de 125 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,04 olarak hesaplanmaktadır.

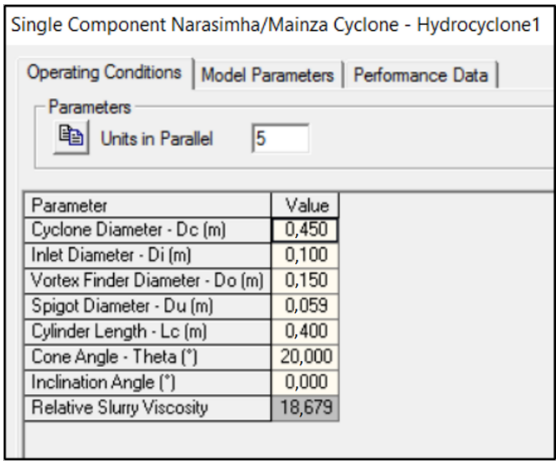


Şekil 4.33 375 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

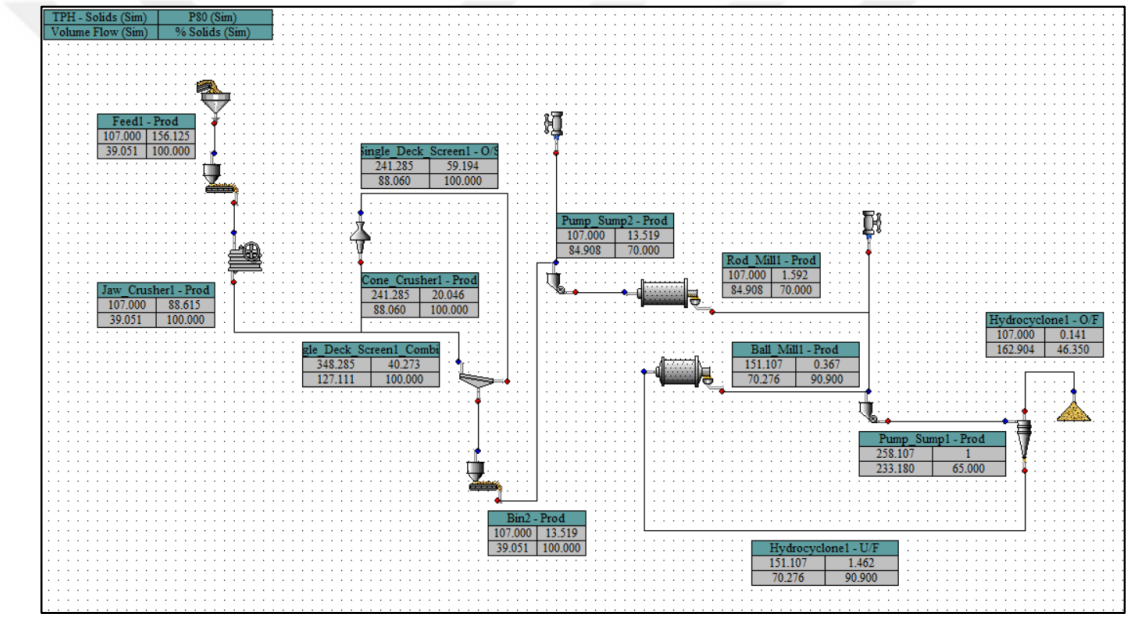
Düzeltilmiş tromp eğrisinden yola çıkılarak "imperfection" değeri 1,114 olarak bulunmuştur.

4.3.2 450 mm Çapında Hidrosiklon

5 adet 450 mm'lik hidrosiklon çalışma parametreleri giriş açıklığı 100 mm, üst çıkış açıklığı 150 mm, alt çıkış açıklığı 59 mm, ve silidirik gövde uzunluğu 400 mm olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 4.34). Simülasyon gerçekleştirildiğinde devreden yük 151,10 t/sa, hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P80 değeri 141µm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.34 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklon ile simülasyon



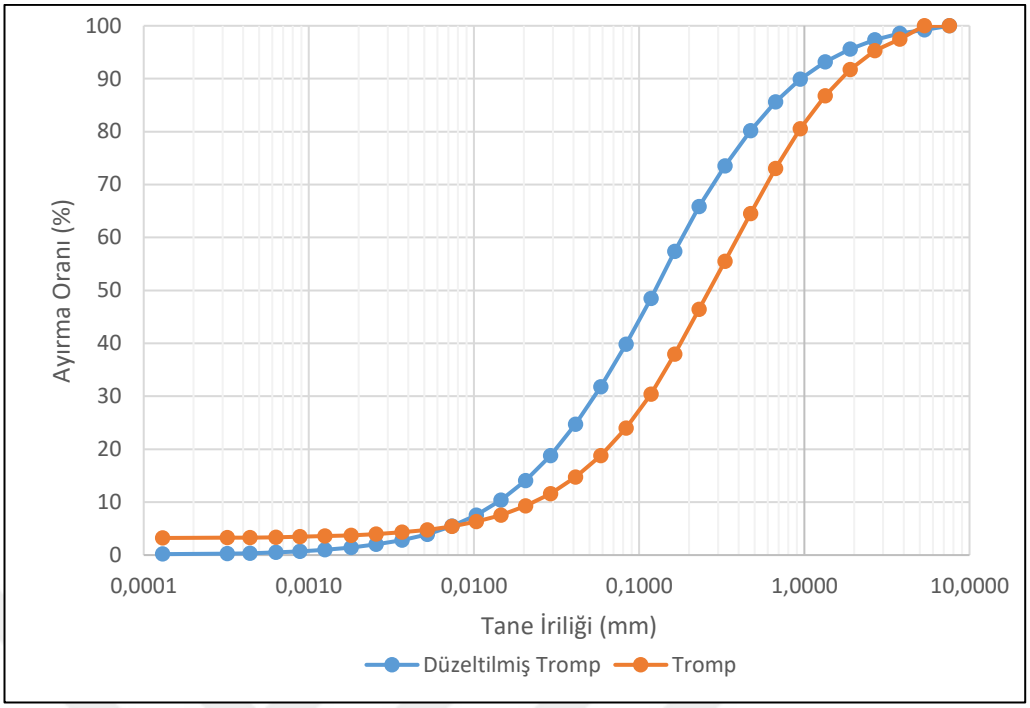
Şekil 4.35 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklon ile simüle edilmiş akım şeması

Üst çıkış açıklığı 150 mm olan hidrosiklon ile simülasyon sonucu hidrosiklon besleme malı, üst akım ve alt akımdan çıkan malzemelere ait kümülatif elek altı verileri Tablo 4.13'te Yer almaktadır. Bu veriler kullanılarak çizilen tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

Tablo 4.13 Üst çıkış açıklığı 150 mm olan 450 mm'lik hidrosiklonun besleme malı, alt akım ve üst akım ürünlerine ait kümülatif elek altı verileri

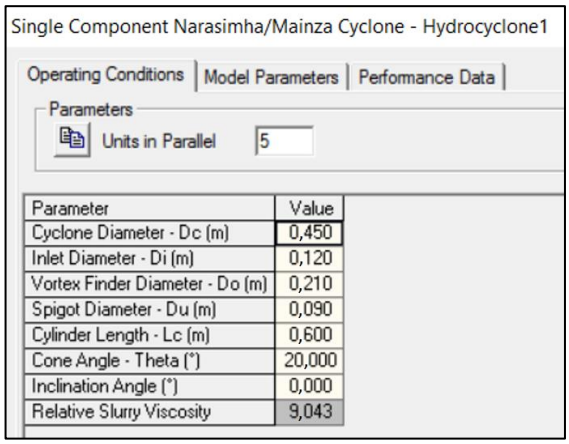
Tane Boyu (mikron)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort, Tane İriliği	Ayırma Oranı	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım				
	%		%		%		%	%	%	mikron		
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,784		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,01	100,00	0,00	0,00	0,00	10,669	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,02	100,00	0,00	100,00	0,03	99,99	0,00	0,02	0,02	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,08	99,98	0,00	100,00	0,13	99,96	0,00	0,07	0,08	5,3345	99,31	99,23
4,419 - 3,125	0,37	99,90	0,01	100,00	0,63	99,84	0,00	0,37	0,37	3,7720	98,70	98,54
3,125 - 2,210	2,23	99,53	0,13	99,99	3,72	99,21	0,05	2,18	2,23	2,6675	97,63	97,35
2,210 - 1,563	8,16	97,30	0,77	99,86	13,39	95,49	0,32	7,84	8,16	1,8865	96,09	95,61
1,563 - 1,105	7,30	89,14	1,07	99,09	11,71	82,10	0,44	6,85	7,30	1,3340	93,92	93,18
1,105 - 0,781	6,67	81,85	1,45	98,02	10,36	70,39	0,60	6,07	6,67	0,9432	91,00	89,90
0,781 - 0,552	6,24	75,18	1,93	96,57	9,29	60,03	0,80	5,44	6,24	0,6669	87,17	85,60
0,552 - 0,390	5,96	68,94	2,54	94,64	8,39	50,74	1,05	4,91	5,96	0,4715	82,32	80,16
0,390 - 0,270	5,78	62,98	3,29	92,10	7,54	42,36	1,36	4,42	5,78	0,3303	76,42	73,54
0,270 - 0,190	5,62	57,20	4,13	88,81	6,68	34,81	1,71	3,91	5,62	0,2300	69,56	65,84
0,190 - 0,138	5,46	51,57	5,00	84,68	5,78	28,13	2,07	3,38	5,46	0,1641	61,99	57,34
0,138 - 0,970	5,24	46,12	5,80	79,68	4,84	22,35	2,41	2,84	5,24	0,1179	54,10	48,49
0,097 - 0,069	4,96	40,87	6,42	73,87	3,93	17,51	2,66	2,30	4,96	0,0833	46,36	39,80
0,069 - 0,048	4,62	35,91	6,78	67,45	3,09	13,58	2,81	1,81	4,62	0,0585	39,18	31,75
0,048 - 0,034	4,24	31,29	6,86	60,67	2,38	10,48	2,84	1,39	4,24	0,0410	32,89	24,69
0,034 - 0,024	3,83	27,05	6,69	53,81	1,81	8,10	2,77	1,06	3,83	0,0290	27,63	18,79
0,024 - 0,017	3,42	23,22	6,31	47,12	1,37	6,30	2,62	0,80	3,42	0,0205	23,39	14,04
0,017 - 0,012	3,01	19,81	5,80	40,81	1,03	4,93	2,41	0,61	3,01	0,0145	20,10	10,34
0,012 - 0,008	2,62	16,79	5,22	35,01	0,79	3,90	2,16	0,46	2,62	0,0103	17,60	7,53
0,008 - 0,006	2,26	14,17	4,59	29,79	0,61	3,11	1,90	0,36	2,26	0,0074	15,74	5,44
0,006 - 0,004	1,92	11,91	3,97	25,20	0,47	2,50	1,65	0,28	1,92	0,0052	14,37	3,91
0,004 - 0,003	1,62	9,99	3,38	21,23	0,37	2,03	1,40	0,22	1,62	0,0037	13,38	2,80
0,003 - 0,002	1,35	8,37	2,84	17,85	0,29	1,66	1,18	0,17	1,35	0,0026	12,66	1,99
0,002 - 0,0015	1,12	7,02	2,36	15,01	0,23	1,37	0,98	0,14	1,12	0,0018	12,15	1,42
0,0015 - 0,0010	0,92	5,91	1,95	12,64	0,18	1,14	0,81	0,11	0,92	0,0013	11,78	1,01
0,0010 - 0,0008	0,75	4,99	1,60	10,69	0,15	0,95	0,66	0,09	0,75	0,0009	11,52	0,71
0,0008 - 0,0005	0,61	4,24	1,30	9,09	0,12	0,80	0,54	0,07	0,61	0,0006	11,34	0,51
0,0005 - 0,0004	0,48	3,63	1,03	7,80	0,09	0,69	0,43	0,05	0,48	0,0004	11,20	0,36
0,0004 - 0,0003	0,38	3,15	0,82	6,76	0,07	0,59	0,34	0,04	0,38	0,0003	11,11	0,25
0,0003 - 0,0000	2,77	2,77	5,95	5,95	0,52	0,52	2,47	0,31	2,77	0,0001	11,04	0,18

Simülasyonda hata veren 450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden d_{75}'değeri 750 µm, d_{25} değeri 90 µm, d_{50} değeri de 310 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,06 olarak hesaplanmaktadır. Hidrosiklon düzeltilmiş tromp eğrisinden yola çıkılarak imperfection değeri 1,21 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.36).



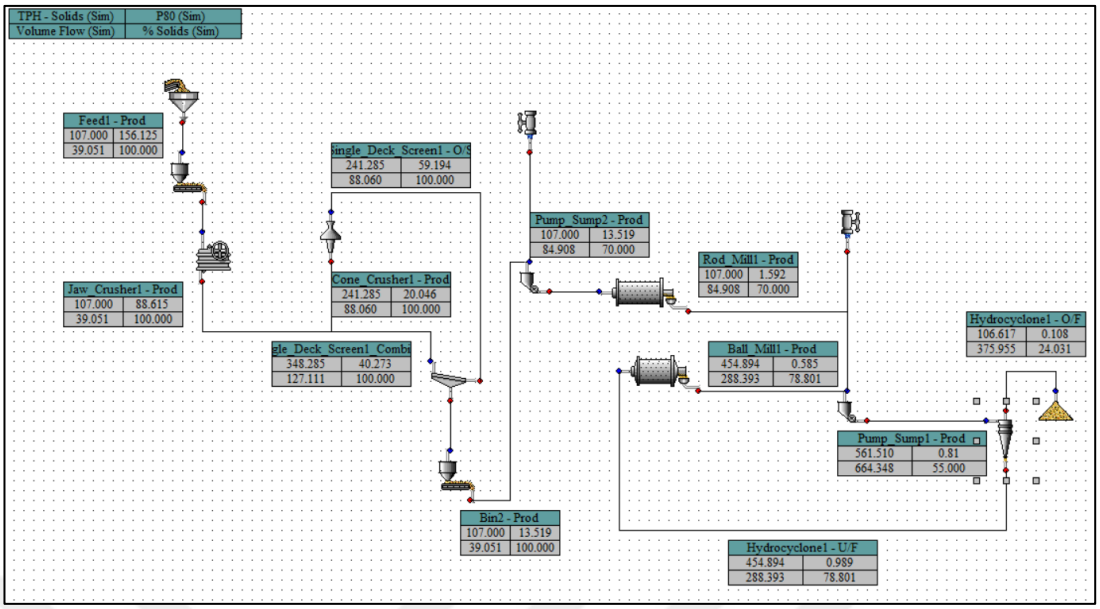
Şekil 4.36 Hata veren 450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

Çapı 450 mm olan hidrosiklonun diğer çalışma parametreleri değiştirilerek, giriş açıklığı 120 mm, üst çıkış açıklığı 210 mm, alt çıkış açıklığı 90 mm silindir uzunluğu 600 mm ve bu siklondan 5 adet olması durumu değerlendirilmiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37 450 mm çapında hidrosiklon parametrelerinin programa girilişi

Parametreler girildikten sonra simülasyon gerçekleştirilmiştir ve akım şemasından hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P_{80} değerinin 108 µm, devreden yükün ise 455 t/sa olduğu görülmektedir (Şekil 4.38).



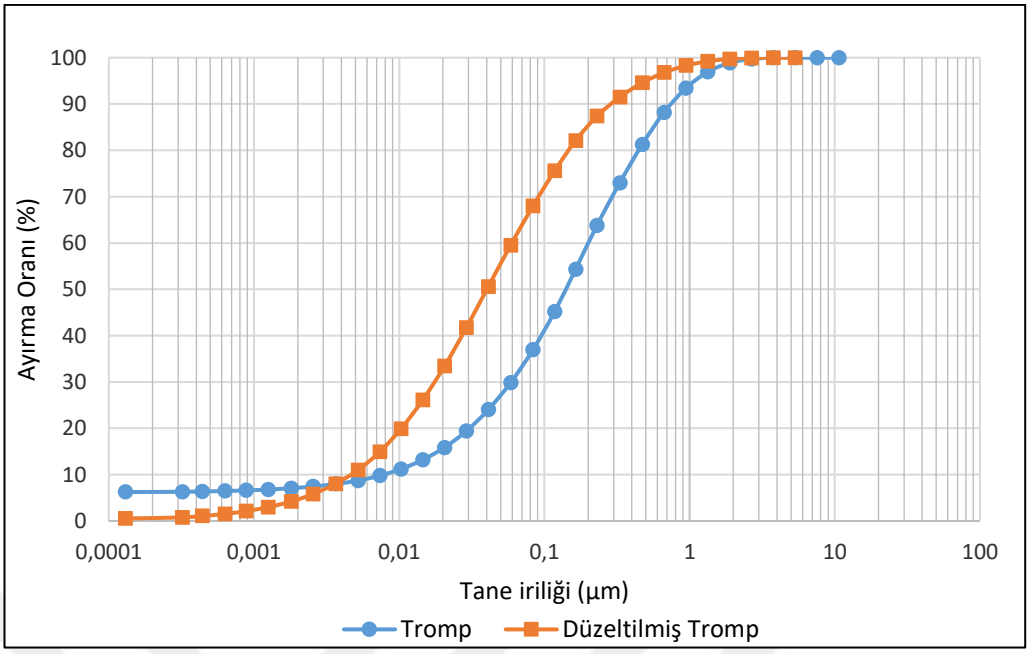
Şekil 4.38 450 mm çapında hidrosiklonla simülasyon sonucu akım şeması

450 mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu elde edilen hidrosiklon besleme malı, alt akım ve üst akım malzemelerinin kümülatif elek altı verileri Tablo 4.14'de verilmiştir. Bu veriler kullanılarak çizilen tromp eğrisi Şekil 4.39'da gösterilmiştir.

Tablo 4.14 450 mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu besleme malı, alt ve üst çıkışa ait ürünlerin kümülatif elek altı verileri

Tane Boyu (mikron)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort, Tane İriliği	AYIRMA ORANI	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım				
	%		%		%		%	%	%	mikron		
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,7840		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	10,6695	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,01	100,00	0,00	100,00	0,01	100,00	0,00	0,01	0,01	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,05	99,99	0,00	100,00	0,06	99,98	0,00	0,05	0,05	5,3345	100,00	100,00
4,419 - 3,125	0,27	99,93	0,00	100,00	0,33	99,92	0,00	0,27	0,27	3,7720	100,00	100,00
3,125 - 2,210	1,62	99,67	0,00	100,00	2,00	99,59	0,00	1,62	1,62	2,6675	99,95	99,93
2,210 - 1,563	6,19	98,05	0,07	100,00	7,62	97,59	0,01	6,18	6,19	1,8865	99,80	99,73
1,563 - 1,105	6,18	91,86	0,18	99,93	7,59	89,96	0,04	6,15	6,18	1,3340	99,43	99,23
1,105 - 0,781	6,38	85,67	0,42	99,75	7,78	82,38	0,08	6,30	6,38	0,9432	98,75	98,29
0,781 - 0,552	6,76	79,30	0,84	99,32	8,15	74,60	0,16	6,60	6,76	0,6669	97,64	96,79
0,552 - 0,390	7,25	72,54	1,52	98,49	8,60	66,46	0,29	6,96	7,25	0,4715	96,02	94,57
0,390 - 0,270	7,74	65,29	2,55	96,97	8,95	57,86	0,48	7,25	7,74	0,3303	93,75	91,49
0,270 - 0,190	8,04	57,55	3,92	94,42	9,00	48,91	0,74	7,29	8,04	0,2300	90,73	87,37
0,190 - 0,138	7,98	49,51	5,52	90,50	8,55	39,91	1,05	6,93	7,98	0,1641	86,86	82,09
0,138 - 0,970	7,48	41,54	7,05	84,98	7,58	31,35	1,34	6,14	7,48	0,1179	82,10	75,60
0,097 - 0,069	6,61	34,06	8,18	77,93	6,24	23,77	1,55	5,06	6,61	0,0833	76,51	67,98
0,069 - 0,048	5,55	27,45	8,69	69,75	4,82	17,53	1,65	3,90	5,55	0,0585	70,28	59,49
0,048 - 0,034	4,49	21,90	8,58	61,06	3,53	12,72	1,63	2,86	4,49	0,0410	63,73	50,56
0,034 - 0,024	3,56	17,40	8,02	52,48	2,51	9,18	1,52	2,04	3,56	0,0290	57,23	41,70
0,024 - 0,017	2,80	13,84	7,20	44,46	1,77	6,67	1,37	1,43	2,80	0,0205	51,15	33,41
0,017 - 0,012	2,20	11,05	6,27	37,27	1,24	4,90	1,19	1,00	2,20	0,0145	45,77	26,09
0,012 - 0,008	1,73	8,85	5,34	31,00	0,88	3,66	1,01	0,71	1,73	0,0103	41,24	19,91
0,008 - 0,006	1,36	7,12	4,48	25,65	0,63	2,78	0,85	0,51	1,36	0,0074	37,58	14,92
0,006 - 0,004	1,08	5,76	3,70	21,17	0,46	2,15	0,70	0,37	1,08	0,0052	34,71	11,01
0,004 - 0,003	0,85	4,69	3,02	17,47	0,34	1,69	0,57	0,28	0,85	0,0037	32,53	8,03
0,003 - 0,002	0,67	3,84	2,44	14,45	0,26	1,35	0,46	0,21	0,67	0,0026	30,90	5,81
0,002 - 0,0015	0,53	3,16	1,96	12,01	0,19	1,09	0,37	0,16	0,53	0,0018	29,70	4,18
0,0015 - 0,0010	0,42	2,63	1,57	10,04	0,15	0,90	0,30	0,12	0,42	0,0013	28,83	2,99
0,0010 - 0,0008	0,33	2,21	1,25	8,47	0,11	0,75	0,24	0,09	0,33	0,0009	28,20	2,13
0,0008 - 0,0005	0,26	1,88	0,98	7,22	0,09	0,63	0,19	0,07	0,26	0,0006	27,75	1,52
0,0005 - 0,0004	0,20	1,63	0,76	6,24	0,07	0,54	0,14	0,05	0,20	0,0004	27,43	1,08
0,0004 - 0,0003	0,15	1,43	0,58	5,49	0,05	0,48	0,11	0,04	0,15	0,0003	27,20	0,76
0,0003 - 0,0000	1,28	1,28	4,91	4,91	0,43	0,43	0,93	0,35	1,28	0,0001	27,03	0,54

450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden d_{75}'değeri 360 µm, d_{25} değeri 45 µm, d_{50} değeri de 145 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,09 olarak hesaplanmaktadır. Hidrosiklon düzeltilmiş tromp yola çıkılarak imperfection değeri 1,256 olarak elde edilmiştir.

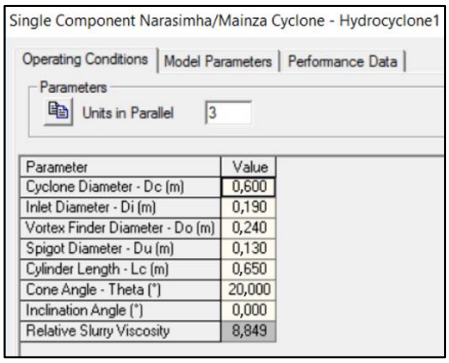


Şekil 4.33 450 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

Hidrosiklon düzeltilmiş tromp eğrisi Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Bu eğriden yola çıkılarak imperfection değeri 1,256 olarak elde edilmiştir.

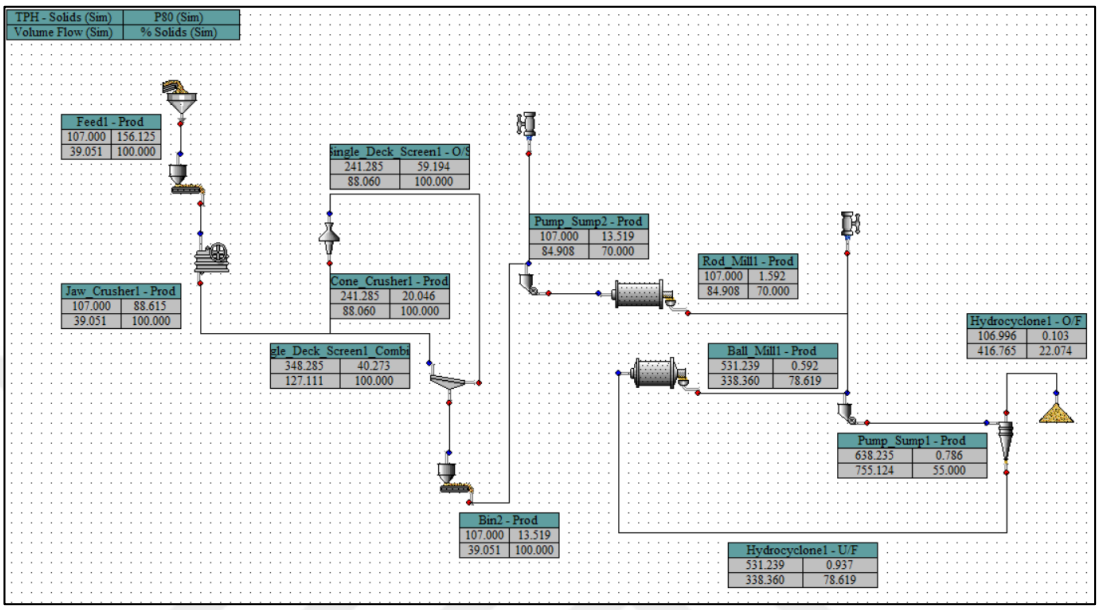
4.3.3 600 mm Çapında Hidrosiklon

Çapı 600 mm olan 3 adet hidrosiklon ile simülasyon yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Hidrosiklon çapı 600 mm, giriş açıklığı 190 mm, üst çıkış açıklığı 240 mm alt çıkış açıklığı 130 mm, silidirik gövde uzunluğu 600 mm olarak seçilmiştir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 600 mm çapında hidrosiklon parametrelerinin programa girilişi

Parametreler girildikten sonra simülasyon gerçekleştirilmiştir ve akım şemasından hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P_{80} değerinin 103 µm olduğu görülmektedir, devreden yük ise 531 t/sa olmaktadır (Şekil 4.35).



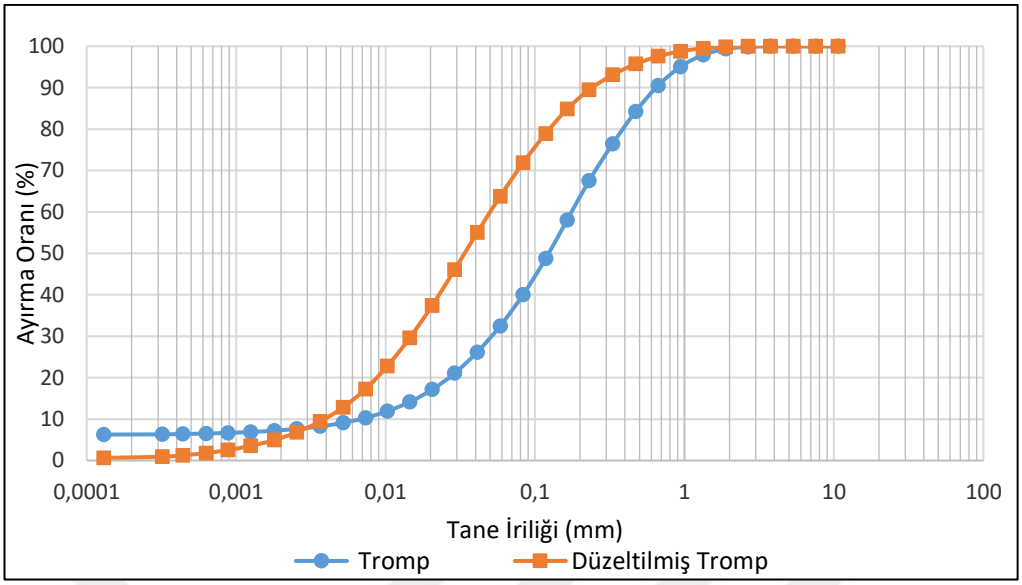
Şekil 4.35 600 mm çapında hidrosiklon ile simülasyon sonucu akım şeması

600 mm'lik hidrosiklon ile simülasyon sonucu elde edilen besleme malı, alt ve üst çıkış ürünlerine ait kümülatif elek altı verileri Tablo 4.15'de verilmiştir. Bu veriler kullanılarak çizilen tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi Şekil 4.36'da gösterilmiştir.

Tablo 4.15 600mm'lik hidrosiklon simülasyonu sonucu besleme malı, alt ve üst çıkışa ait ürünlerin kümülatif elek altı verileri

Tane Boyu (mikron)	Besleme Malı		Üst Akım		Alt Akım		Besleme Malına Göre		Besleme Malı Hesapla	Ort, Tane İriliği	Ayırma Oranı	Düzeltilmiş Ayırma Oranı
		∑E.A.		∑E.A.		∑E.A.	Üst Akım	Alt Akım				
	%		%		%		%	%	%	mikron		
17,068 - 12,500	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	14,7840		
12,500 - 8,839	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	10,6695	100,00	100,00
8,839 - 6,250	0,01	100,00	0,00	100,00	0,01	100,00	0,00	0,01	0,01	7,5445	100,00	100,00
6,250 - 4,419	0,05	99,99	0,00	100,00	0,06	99,98	0,00	0,05	0,05	5,3345	100,00	100,00
4,419 - 3,125	0,25	99,94	0,00	100,00	0,30	99,92	0,00	0,25	0,25	3,7720	100,00	100,00
3,125 - 2,210	1,55	99,68	0,00	100,00	1,86	99,62	0,00	1,55	1,55	2,6675	99,98	99,97
2,210 - 1,563	5,94	98,14	0,04	100,00	7,13	97,76	0,01	5,93	5,94	1,8865	99,89	99,85
1,563 - 1,105	6,02	92,20	0,13	99,96	7,21	90,63	0,02	6,00	6,02	1,3340	99,64	99,50
1,105 - 0,781	6,30	86,18	0,33	99,83	7,50	83,43	0,06	6,25	6,30	0,9432	99,12	98,79
0,781 - 0,552	6,77	79,87	0,71	99,50	7,99	75,92	0,12	6,65	6,77	0,6669	98,25	97,57
0,552 - 0,390	7,36	73,10	1,36	98,79	8,57	67,93	0,23	7,13	7,36	0,4715	96,91	95,72
0,390 - 0,270	7,94	65,74	2,37	97,43	9,06	59,36	0,40	7,54	7,94	0,3303	95,00	93,09
0,270 - 0,190	8,32	57,80	3,77	95,06	9,24	50,30	0,63	7,69	8,32	0,2300	92,41	89,50
0,190 - 0,138	8,30	49,48	5,43	91,30	8,87	41,06	0,91	7,39	8,30	0,1641	89,02	84,82
0,138 - 0,970	7,78	41,18	7,06	85,86	7,92	32,19	1,18	6,59	7,78	0,1179	84,77	78,94
0,097 - 0,069	6,83	33,41	8,29	78,80	6,54	24,27	1,39	5,44	6,83	0,0833	79,65	71,87
0,069 - 0,048	5,67	26,58	8,86	70,51	5,02	17,73	1,48	4,18	5,67	0,0585	73,80	63,78
0,048 - 0,034	4,51	20,91	8,76	61,65	3,66	12,71	1,47	3,04	4,51	0,0410	67,46	55,01
0,034 - 0,024	3,51	16,40	8,18	52,89	2,57	9,05	1,37	2,14	3,51	0,0290	60,98	46,05
0,024 - 0,017	2,71	12,89	7,32	44,72	1,78	6,48	1,23	1,48	2,71	0,0205	54,74	37,43
0,017 - 0,012	2,09	10,18	6,36	37,40	1,23	4,69	1,07	1,03	2,09	0,0145	49,07	29,60
0,012 - 0,008	1,62	8,08	5,40	31,04	0,86	3,46	0,91	0,72	1,62	0,0103	44,18	22,84
0,008 - 0,006	1,26	6,46	4,51	25,64	0,61	2,60	0,76	0,51	1,26	0,0074	40,15	17,26
0,006 - 0,004	0,99	5,20	3,72	21,13	0,44	1,99	0,62	0,37	0,99	0,0052	36,95	12,83
0,004 - 0,003	0,77	4,21	3,03	17,41	0,32	1,55	0,51	0,27	0,77	0,0037	34,48	9,41
0,003 - 0,002	0,61	3,43	2,44	14,38	0,24	1,23	0,41	0,20	0,61	0,0026	32,61	6,84
0,002 - 0,0015	0,48	2,83	1,96	11,94	0,18	0,99	0,33	0,15	0,48	0,0018	31,23	4,93
0,0015 - 0,0010	0,38	2,35	1,57	9,98	0,14	0,81	0,26	0,11	0,38	0,0013	30,22	3,53
0,0010 - 0,0008	0,30	1,97	1,24	8,41	0,10	0,68	0,21	0,09	0,30	0,0009	29,49	2,52
0,0008 - 0,0005	0,23	1,68	0,97	7,17	0,08	0,57	0,16	0,07	0,23	0,0006	28,97	1,80
0,0005 - 0,0004	0,18	1,45	0,75	6,20	0,06	0,49	0,13	0,05	0,18	0,0004	28,59	1,28
0,0004 - 0,0003	0,13	1,27	0,57	5,45	0,05	0,43	0,10	0,04	0,13	0,0003	28,32	0,91
0,0003 - 0,0000	1,14	1,14	4,88	4,88	0,38	0,38	0,82	0,32	1,14	0,0001	28,13	0,64

600 mm'lik hidrosiklon tromp eğrisinden d_{75}'değeri 320 µm, d_{25} değeri 38 µm, d_{50} değeri de 125 µm olarak görülmektedir. Imperfection değeri 1,13 olarak hesaplanmaktadır. Hidrosiklon düzeltilmiş tromp eğrisinden yola çıkılarak imperfection değeri 0,841 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.36 600 mm'lik hidrosiklonun tromp eğrisi ve düzeltilmiş tromp eğrisi

250 mm, 375 mm, 450 mm ve 600 mm çaplara sahip hidrosiklonlar kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen veriler kullanılarak tromp eğrileri çizilmiştir. Tromp eğrileri değerlendirildiğinde sadece 600 mm'lik hidrosiklonun imperfection oranı 1'in altına inerek 0,841 olmuştur. Tablo 4.16'da farklı çalışma parametrelerine sahip hidrosiklonlar ile simülasyon yapılması durumunda devreden yük, üst akım P_{80} değeri ve ayırma performansı verileri yer almaktadır.

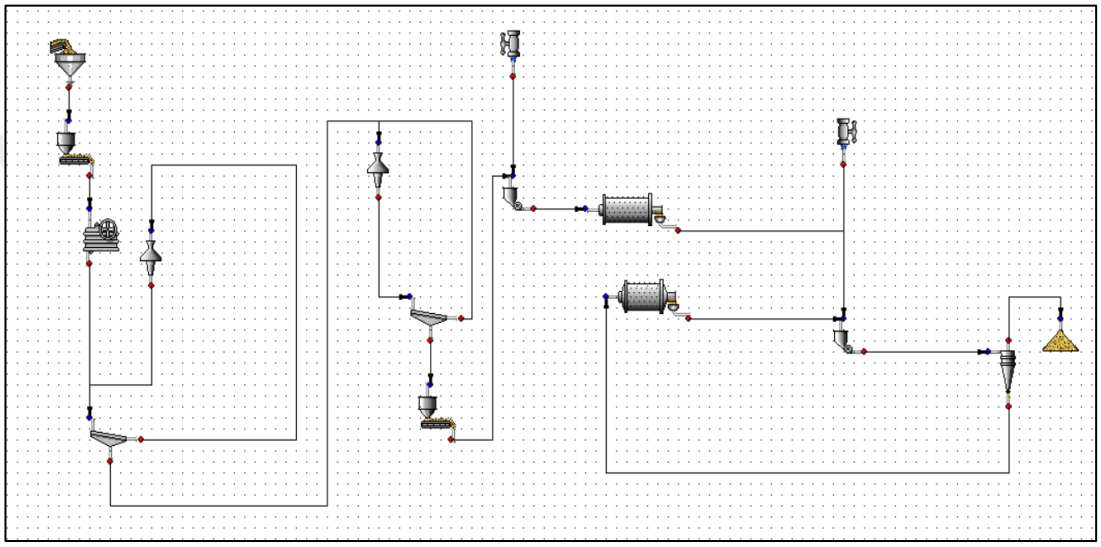
Tablo 4.16 Farklı çaplardaki hidrosiklonların simülasyon sonuçları

Parametre	Hidrosiklon Modelleri					
Çap (mm)	250	375*	375	450	450	600
Giriş açıklığı (mm)	73	73	110	100	120	190
Üst çıkış açıklığı (mm)	90	100	190	150	210	240
Alt çıkış açıklığı (mm)	59	59	80	59	90	130
Gövde uzunluğu (mm)	300	400	550	400	600	650
Siklon sayısı	8	8	6	5	5	3
Besleme Katı %	70	65	55	65	55	55
Devreden yük (t/sa)	818	381	561	151	455	531
Üst Akım P_{80} (µm)	99	111	104	141	108	103
Imperfection	1,32	1,33	1,04	1,06	1,09	1,13
Düzeltilmiş Imperfection	1,23	1,19	1,14	1,21	125	0,841
Kapasite (t/sa)	107	107	107	107	107	107

Simülasyon sonucu 375* mm'lik siklon bu şartlarda çalışmamaktadır.

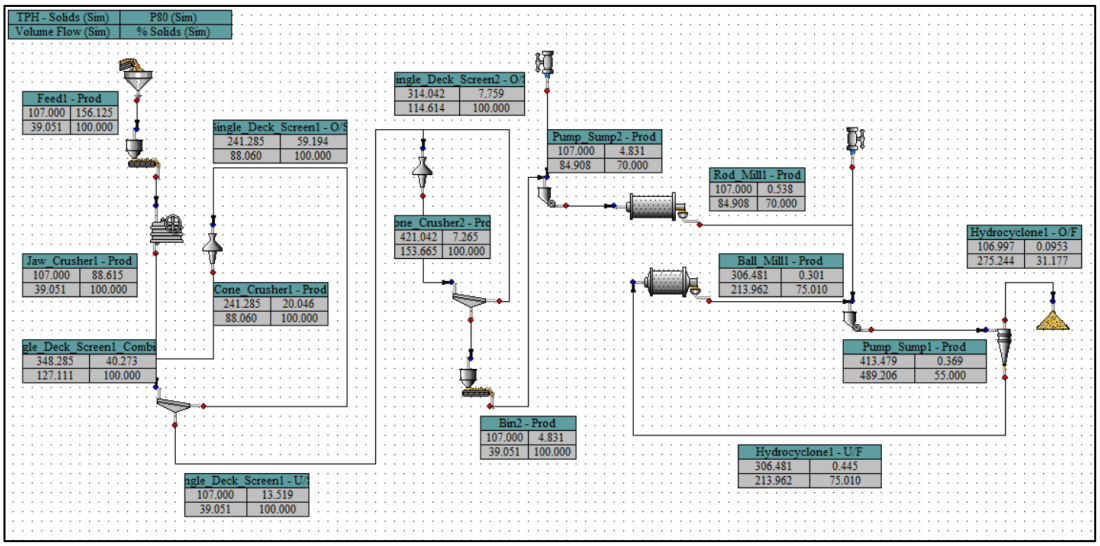
4.4 Akım Şemasına İnce Kırma Devresi Eklenerek Öğütme Devresine Daha İnce Malzemenin Beslenmesi Durumu

Akım şeması üzerinde 20 mm'lik tek katlı elek sonrası ürün doğrudan çubuklu değirmene beslenmesi yerine, ince kırmaya tabi tutulması durumu simüle edilmiştir. Bunun için tersiyer kırıcı olarak çıkış açıklığı 8 mm olan bir konik kırıcı seçilmiş ve 6 mm'lik bir elekle kapalı devre çalıştırılmıştır (Şekil 4.37).



Şekil 4.37 İnce kırma devresi içeren akım şeması

Bilyalı değirmende bilya ebatları 50 mm olması durumunda simülasyon sonucu akım şeması Şekil 4.38'de gösterilmiştir. Birincil kırma devresi P_{80}'i 13,5 mm olan ürün ince kırmaya verilmiştir. Öğütme devresine beslenen ince kırma devresi ürününün P_{80} değeri 4,83 mm'dir. Çubuklu değirmen den çıkan ürünün P_{80} değeri 538 µm, bilyalı değirmen ürünün ise 301 µm olmaktadır. Hidrosiklon üst akımından elde edilen ürünün P_{80} değeri 95 µm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.38 Simüle edilmiş olarak ince kırma devresi içeren tesis

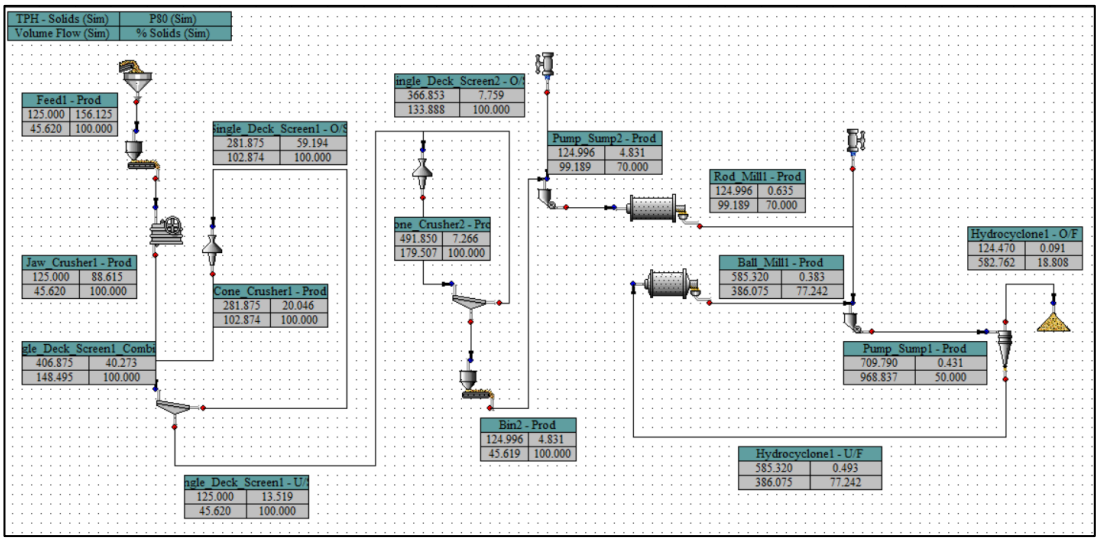
4.4.1 Tesis Kapasitesinin 125 t/sa Olması Durumu

Tersiyer kırıcının eklenmesi öğütmeye beslenen cevherin daha ince boyutta olmasını sağlamaktadır. Bu durumda kapasite artırılmasına gidilmesi incelenmiştir. 107 t/sa kapasitede tesis 3 adet 600 mm'lik hidrosiklon ile çalışabilmektedir. Tesis kapasitesi 125 t/sa olması durumunda Tablo 4.17'de verilen hidrosiklon çalışma parametreleri ile akım şeması simüle edilmiştir.

Tablo 4.17 125 t/sa kapasitede hidrosiklon çalışma parametreleri

Siklon	600 mm
Giriş açıklığı (mm)	190
Üst çıkış açıklığı (mm)	240
Alt çıkış açıklığı (mm)	130
Silindirik gövde uzunluğu (mm)	650
Adet	4

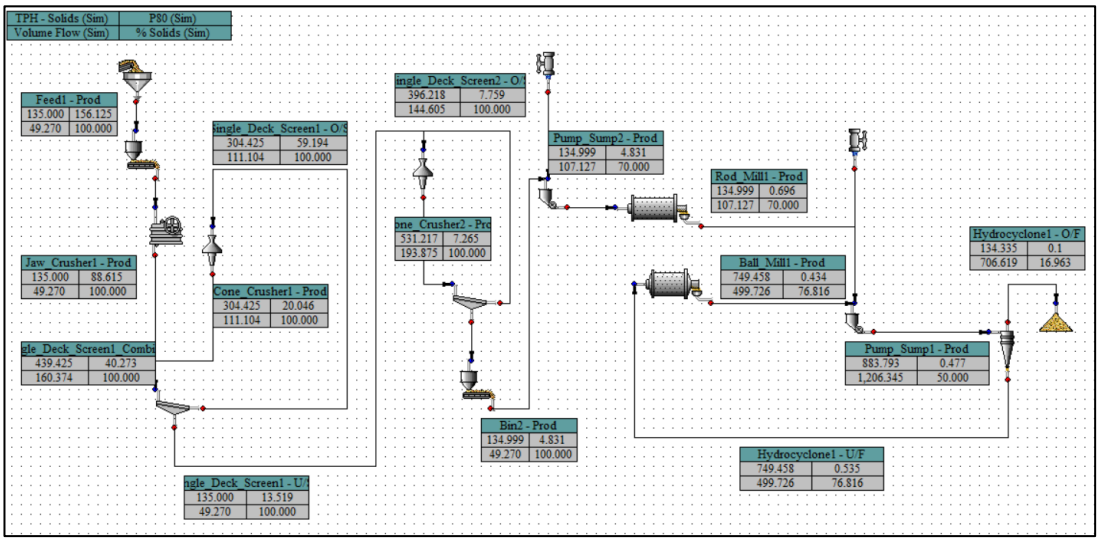
Tesis 125 t/sa kapasitede 4 adet 600 mm'lik hidrosiklon ile çalışabilmektedir. Hidrosiklon üst çıkışından elde edilen ürünün P_{80} değeri 91 µm, devreden yük 585,64 t/sa olmaktadır (Şekil 4.39).



Şekil 4.39 125 t/sa kapasitede simüle edilen akım şeması

4.4.2 Tesis Kapasitesinin 135 t/sa Olması Durumu

135 t/sa bilya ebatları 40 mm olarak yapılan simülasyon sonucu akım şeması Şekil 4.40'da gösterilmiştir. Hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin P80 değeri 100 µm, devreden yük 749,50 t/sa olmaktadır. Tesis bu şartlarda 5 adet hidrosiklon ile çalışabilmektedir.



Şekil 4.40 135 t/sa kapasitede siülasyon sonucu akım şeması

Artan kapasitelerde yapılan simülasyon sonucu tesis devreden yükünün arttığı, hidrosiklon üst akımından çıkan malzemenin irileştiği görülmüştür. Artan kapasite ile ihtiyaç duyulan hidrosiklon sayısıda artmaktadır. Tablo 4.18' de görüldüğü gibi 107 t/sa kapasitede 3 adet 600 mm'lik hidrosiklon çalışırken, 135 t/sa kapasitede hidrosiklon sayısı 5'e yükselmiştir.

Tablo 4.18 600 mm'lik siklon için farklı kapasitelerin uygulnaması

	107 t/sa	125 t/sa	135 t/sa
Hidrosiklon üst akım P_{80} (µm)	95	91	100
Hidrosiklon sayısı	3	4	5
Devreden yük (t/sa)	306	585	749
Besleme katı oranı (%)	55	50	50
Değirmen bilya çapı (mm)	50	40	30
Değirmenden çıkan ürün P_{80} (µm)	301	383	434

BÖLÜM BEŞ
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Son yıllarda cevher hazırlama tesislerinin işleyişi ve tasarımı için bir yöntem olarak literatürde bir çok bilgisayar simülasyon tekniği ortaya çıkmıştır. Simülasyon yöntemi araştırmalarda popüler bir konu ve uğraş haline gelmiş ve bu durum simülasyonu kalıcı ve pratik bir araç haline getirmiştir. Simülasyon aslında çalışmayan bir sistemi model olarak kullanabilecek herhangi bir yöntemdir. Bir simülasyonun elde edilebilmesi için çeşitli yollar vardır, ancak en etkili olanı bilgisayar destekli olanlarıdır. Var olan bir tesis bilgisayar tarafından karakterize edilerek programlandığı takdirde değişen koşullarda nasıl tepki verdiği ve performansı tahmin edilebilmektedir. Simülasyon tesiste uygulamaya gerek kalmadan birçok parametrede değerlendirme yapabildiği için çok kullanışlı bir yöntemdir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların amacıda bilgisayar destekli simülasyon tekniği kullanılarak bir altın zenginleştirme tesisinin simülasyonunu gerçekleştirmektir. Tesis ekipman parametrelerinde ve çalışma şartlarında değişiklikler yapılarak, bu değişikliklerin tesiste ne gibi etkileri olacağının incelenmesidir. Bu çalışma için JKSimMet v6.0.2 paket programı kullanılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

Tesisten alınan numunelerden sadece tüvenan cevherin tane boyut dağılımı ve iş endeksi ile numune alındığı gün geçerli tesis işletme parametreleri simulasyon modeline girilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 107 t/sa kapasite ile çalışan tesisin simülasyonu sonucu tesiste çubuklu değirmen ve bilyalı değirmenden çıkan ürünlerin P_{80} değerlerinin, hidrosiklon besleme malı, üst akım ve alt akımdan çıkan malzemelerin P_{80} değerlerinin ve devreden yükün gerçek verilerle birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç simülasyon modelinin çalıştığını göstermektedir.

- Çubuklu değirmene beslenen malzemenin pülp katı oranı ayarlanarak tesis balansı yapıldıktan sonra hidrosiklon besleme malı, alt çıkış ve üst çıkışların pülp katı oranları bir birine yakın olduğu görülmektedir.

- Tesiste bulunan 8 adet 250 mm çaplı hidrosiklon yerine çapı 320 mm, 400 mm ve 600 mm olan hidrosiklonlar konularak simülasyon denenmiştir. Simülasyon sonucunda 250 mm çaplı 8 adet hidrosiklon yerine 3 adet 600 mm'lik hidrosiklon kullanılması durumunda devreden yükün azaldığı görülmüştür. Bu durum kapasite artışı için simülasyon çalışmalarına yön vermiştir.

- Tesisin kırma devresine bir tersiyer kırıcı eklenerek çubuklu değirmen besleme malı tane boyutu ve dolayısı ile çıkışı ve bilyalı değirmen beslme malı tane boyutu da düşürülüp mevcut bilye ebadından daha küçük bilyalar ile tesis kapsitesi ne kadar arttırılabilir hususu model kullanılarak irdelenmiştir. Tersiyer kırıcı kullanımı ile değirmen bilya çapı 50 mm'den 30 mm'ye düşürülerek 5 adet 600 mm'lik siklon ile tesis kapasitesinin 107 t/sa'den 135 t/sa'a kadar arttırılabileceği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak bilgisayar destekli simülasyon programları her alanda olduğu gibi cevher hazırlamada da önemini göstermektedir. Tesiste herhangi bir ekipman değişikliği veya çalışma şartlarında değişiklik yapılması durumunda tesise olan etkileri gözlemlenebilmektedir. Bu çalışmada da hidrosiklon veya bilyalı değirmen çalışma parametrelerinde yapılan değişikliklerin ürünler üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu durum tesiste yapılacak değişikliklerin etkilerinin simülasyonla önceden belirlenmesi ve gereksiz yere yatırım yapılmasını önlemektedir. Aynı zamanda simülasyon tekniği ile planlama süresi en aza indirgenebilmektedir.

KAYNAKLAR

Asbjörnsson, G. (2013). *Modelling and simulation of dynamic behaviour in crushing plants*. Bitirme Tezi, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Evertsson, C.M., (2000). *Cone crusher performance*, in *department of mahine and vehicle systems*. Doktora Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.

González, A., Rayo, J., ve Campos, J.,(2001). *Applications of discrete-event simulation for mining process plants in chile.* 19 Kasım 2015. http://www.iiis.org/CDs2012/CD2012SCI/ IMETI_2012/PapersPdf/FA116HF.pdf

Jankovic, A., Dundar, H., ve Mehta, R. (2010). Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore. *The Journal of the Southern African Institute of Mining*, 141-146.

JKTech, (2013). *User manual.* 24 Mart 2015. http://jktech.com.au /sites/default/files/brochures/Software_JKSimFloat.pdf, Brisbane

JKTech, (2014). *Simulating Comminution and Classification Circuits with JKSimMet.* 19 Şubat 2015. http://jktech.com.au/sites/default/files/brochures/ Software_ JKSimMet. pdf, Brisbane: AUSTRALIA

Johansson, R., (2011). *Dry classification of fine aggregates for concrete and asphalt*. Bitirme Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.

King, R.P., (2001). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier.

Lee, E., (2012). *Optimization of compressive crushing*. Doktora Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Lynch, A.J. ve Morrison, R.D. (1999). Simulation in mineral processing: history, present status and possibilities. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 99(6), 283-288.

Merks, J.W, (1990). Materials handling in pyrometallurgy. *Proceedings of the International Symposium on Materials Handling in Pyrometllurjy*, 100.

Merritt, P.C. (1984). *Book of flowsheets*. 207. New York: McGraw-Hill, Mining Information Services.

METSIM, (2009). *Metsim features*. 19 Mart 2015. http://www.metsim.com/linked/metsim-brochure1.pdf,

Mineraltech, (2004). *Modsim, Simulation of ore dressing plants - the basic principles*. 21 Mart 2015, http://www.mineraltech.com/MODSIM/ModsimTraining/Module1/Simulation.PDF

Mular, A. L., Halbe, D. N. ve Barratt, D. J. (Ed). (2002). *Mineral processing plant design, practice and control* (383-404). Littletton; SME

Napier-Munn, T., ve Wills, B. A. (2006). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7). London: Elsevier.

Powell, M. (2010). Enlightened circuit design is essential to the take-up of new equipment. *Draft Paper and Presentation for MEI Comminution'10 Conference*.

Stafhammar, M.S. (2002). *Screening of crushed rock material*, in *department of mahine and vehicle systems*. Doktora Tezi, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Sturgul, J. R., ve Li, Z. (1997). New developments in simulation technology and applications in the minerals industry. *International Journal of Mining*, 11(4), 159.

Tromans, D. ve Meech, J.A. (2002). *A fundamental analysis of fracture mechanics of minerals during comminution*. 09 Ağustos 2012. www.mining.ubc.ca /cerm3/energy%20efficiency.html

Wills, B.A., (1986). Complex circuit mass balancing-A simple, practical, sensitivity Analysis. *International Journal of Mineral Processing,(10), 245-262*

Wills, B.A., (1997). *Mineral processing technology*, (6 Ed). Oxford: Butterworth.

Yersel, E. (2012). *Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesislerinin simülasyon yöntemiyle verimliliğinin artırılması*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.