

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ ÜRÜNLÜ AĞIR ORTAM SİKLONUNUN AYIRMA PERFORMANSI VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf Enes PURAL

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

ARALIK 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ ÜRÜNLÜ AĞIR ORTAM SİKLONUNUN AYIRMA PERFORMANSI VE
SİMÜLASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yusuf Enes PURAL
(505161118)**

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Feridun BOYLU

ARALIK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505161118 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Yusuf Enes PURAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Üç Ürünlü Ağır Ortam Siklonunun Ayırma Performansı Ve Simülasyonu” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Feridun BOYLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fırat Burat**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan Hacıfazlıoğlu
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 15 Kasım 2019
Savunma Tarihi : 11 Aralık 2019

Eşime ve oğluma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca teknik imkanlarından yararlandığım Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Gülay Bulut’a ve bölümde görev yapan saygıdeğer bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenim sürecim boyunca hem akademik hem manevi açıdan benden desteğini esirgemeyen, bilgi ve birikimini tümüyle aktarmaya çalışan çok değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Feridun Boylu’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimi boyunca desteğini her zaman hissettiğim, öğrendiğim birçok pratik uygulamada büyük katkısı olan Dr. Mustafa Özer’e teşekkür ederim. Her anlamda bana destek olan, gerektiğinde arkamı toplayan iş arkadaşlarım Araş. Gör. Esra Tanısalı’ya, Araş. Gör. Zeynep Üçerler’e, Araş. Gör. Berivan Tunç’a ve Araş. Gör. Tülay Türk’e teşekkür ederim.

Tez çalışmasında kullandığım numuneyi temin ettiğim Akkurt Madenciliğe, uygun şartları sağlayan ve bu süreçte bana destek olan, Karbomet Madenciliğe ve Sayın Bahattin Kurnaz’a teşekkürü borç bilirim.

Her zaman yanımda olan, yüksek lisans eğitimi ve özellikle tez yazım sürecinde sabır ve anlayışla bana destek veren en kıymetlim sevgili eşim ile bütün bunlardan habersiz en büyük neşe kaynağım oğluma en içten sevgi ve teşekkürlerimi iletirim. Beni yetiştirip bugünlere ulaştıran canım anneme ve babama saygı, sevgi ve minnetle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, İTÜ BAP birimi tarafından “MYL-2018-41960” proje kodu ile yüksek lisans tez projesi olarak desteklenmiştir.

Kasım 2019

Yusuf Enes Pural
(Cevher Hazırlama Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri	3
2.1.1 Yaş Yöntemler	5
2.1.1.1 İri ve orta boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesi.....	5
2.1.1.2 İnce ve çok ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesi	7
2.1.2 Kuru yöntemler	8
2.2 Üç Ürünlü Ağır Ortam Siklonları.....	8
2.3 Performansa Etki Eden Parametreler	13
2.3.1 Ağır ortam özelliklerinin siklon performansına etkisi	13
2.3.2 Çalışma koşullarının siklon performansına etkisi	15
2.4 Performans Değerlendirme Kriterleri	19
2.4.1 Bağımlı kriterler	20
2.4.2 Bağımsız kriterler.....	20
3. SAHA ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1 Malzeme	24
3.2 Yöntem	31
3.3 Hesaplanan Dağılımların Kontrolü	34
4. SONUÇLAR	37
4.1 Sistemde Malzemenin Ufalanması.....	37
4.2 Tromp Eğrileri.....	37
4.3 Ortam Stabilesi ve Bölünmesi.....	44
4.4 ÜÜAOS Geometrisinin İncelenmesi	45
4.5 ÜÜAOS Simülasyonu	52
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SEMBOLLER

SG_f	: Beslenen ortam yoğunluğu
SG_u	: Alt akım ortam yoğunluğu
SG_o	: Üst akım ortam yoğunluğu
RD₅₀	: Ayırma yoğunluğu
E_p	: Hata faktörü
d	: Tane boyutu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : DSM standart siklon ölçüleri.....	18
Çizelge 3.1 : Tüvenan kömür fraksiyonel analiz sonuçları (kuru baz).....	26
Çizelge 3.2 : Malzeme balansı örnek verileri.	33
Çizelge 3.3 : Hesaplanan kül-kükürt ile gerçek değerlerin karşılaştırması.	34
Çizelge 3.4 : Hesaplanan dağılımlar ile Mayer eğrisine göre teorik dağılımların karşılaştırılması.	34
Çizelge 4.1 : Boyuta bağlı RD_{50} ve E_p değerleri.....	40
Çizelge 4.2 : Besleme ve ürün çıkışlarının ortam yoğunlukları.	44
Çizelge 4.3 : ÜÜAOS Larcodems ünitesi ve AOS üniteleri çapları ve beslenen kömür maksimum boyutu.....	46
Çizelge 4.4 : Larcodems için simülasyon parametreleri.....	54
Çizelge 4.5 : AOS için simülasyon parametreleri.	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Başlıca kömür zenginleştirme işlemleri için tercih edilen tane boyut aralıkları.	3
Şekil 2.2 : Klasik kömür hazırlama tesislerinin akım şeması.	4
Şekil 2.3 : Gelecekte uygulanması düşünülen akım şeması.	4
Şekil 2.4 : Jigde tabaka oluşumu.	5
Şekil 2.5 : Tromp banyosu.	6
Şekil 2.6 : Drewboy ayırıcı.	6
Şekil 2.7 : WEMCO tamburu.	6
Şekil 2.8 : Varil yıkayıcı.	7
Şekil 2.9 : Ağır ortam siklonu.	7
Şekil 2.10 : Graviye beslemeli (a) ve Popma beslemeli (b) üç ünlü a.o.s.	9
Şekil 2.11 : 900/550 mm ÇMS'nin şematik görünümü.	11
Şekil 2.12 : Siklonlarda basıncın hesaplanması.	16
Şekil 2.13 : Dağılım eğrisi (tromp eğrisi).	21
Şekil 3.1 : Akkurt kömür hazırlama tesisi.	23
Şekil 3.2 : Tesis ve ÜÜAOS'dan bazı görüntüler	25
Şekil 3.3 : Tüvenan Kömür Boyut Dağılımı.	26
Şekil 3.4 : +50 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	27
Şekil 3.5 : -50+35 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	27
Şekil 3.6 : -35+25 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	28
Şekil 3.7 : -25+19 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	28
Şekil 3.8 : -19+13 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	28
Şekil 3.9 : -13+9 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	29
Şekil 3.10 : -9+6 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	29
Şekil 3.11 : -6.3+4.76 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	29
Şekil 3.12 : -4.76+3.36 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	30
Şekil 3.13 : -3.36+0.5 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.	30
Şekil 3.14 : Akkurt Kömür Hazırlama Tesisinin Genel Akım Şeması.	32
Şekil 4.1 : Yıkama öncesi ve sonrası beslenen kömürün boyut dağılımları.	37
Şekil 4.2 : Boyuta göre dağılım eğrileri.	39
Şekil 4.3 : Boyuta bağlı E_p değerleri.	40
Şekil 4.4 : Boyuta bağlı ayırma yoğunlukları.	42
Şekil 4.5 : ÜÜAOS birinci ve ikinci ayırma ünitelerinde gözlemlenen ayırma yoğunlukları arasındaki farkın boyuta göre değişimi.	43
Şekil 4.6 : Boyuta bağlı olarak dağılım eğrileri-özet gösterim.	43
Şekil 4.7 : ÜÜAOS boyut ve kapasite ilişkisi.	47
Şekil 4.8 : ÜÜAOS, Larcodems-AOS üniteleri ortam akış yönleri.	48
Şekil 4.9 : Akkurt Kömür Hazırlama Tesisinde kurulu olan ÜÜAOS geometrisi ve ortam akış yönleri.	49
Şekil 4.10 : Multotec firması kataloglarında yer alan farklı çaplardaki siklonlara ait şist atma kapasiteleri.	50

Şekil 4.11 : Spigot kapasitesi hesabı malzeme dengesi.	51
Şekil 4.12 : Gerçek vs. simülasyon kül değerleri	55
Şekil 4.13 : Gerçek vs simülasyon miktar değerleri.	55

ÜÇ ÜRÜNLÜ AĞIR ORTAM SİKLOUNUN AYIRMA PERFORMANSI VE SİMÜLASYONU

ÖZET

Kömür, dünyanın birincil enerji ihtiyacının %25'inden fazlasını sağlamaktadır. Dünya elektriğinin %40'ı termal kömüre, demir-çelik üretiminin ise yaklaşık %70'i metalurjik kömüre bağımlıdır. Ayrıca çeşitli uç ürünlerin üretiminde de önemli bir bileşen olarak farklı sanayi alanlarında da kömür kullanılmaktadır. Kömürün yıkanarak kullanım alanına uygun özelliklere getirilmesi ise kaçınılmaz bir zorunluluktur. Bu amaçla günümüze kadar çok çeşitli yöntem ve cihaz geliştirilmiştir ve geliştirilmeye de devam edilmektedir. Günümüzde kömür hazırlama tesislerinin akım şeması iri, orta, ince ve çok ince boyutlu kömürlerin farklı cihazlarda yıkandığı birbirine paralel iki veya daha fazla devre içerecek şekilde standart hale gelmiştir. İri ve orta boyutlarda ağır ortam tekneleri ve siklonu, ince boyutlarda spiral ve çok ince boyutlarda ise flotasyon yöntemi kullanılmaktadır.

Üç ürünlü ağır ortam siklonları (ÜÜAOS) kömür hazırlama tesislerinde yaygın kullanılan bu tipik akım şemasının sadeleştirilmesi, bakım onarım masraflarının azaltılması, manyetit sarfiyatların düşürülmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Dünyada, özellikle Çin'de, yaygın olarak kullanılan bu cihaz, ülkemizde de çeşitli bölgelerde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca cihazın “çift makaralı ağır ortam ayırma sistemi” adıyla patenti alınmıştır. Üç ürünlü ağır ortam siklonları temel olarak birbirine bağlı bir Larcodems ayırıcı ve ağır ortam siklonundan oluşmaktadır. Tüvenan kömür, ilk ayırma ünitesi olan Larcodems'e beslenmekte, buradan temiz kömür elde edilmektedir. İlk ünitenin şisti (ağır ürün-batan ürün) ikinci ayırma ünitesi olan ağır ortam siklonuna (AOS) geçerek, burada mikst ve şist olarak ayrılmaktadır. ÜÜAOS pompa veya gravite beslemeli olarak çalışabilmektedir. Sisteme tek yoğunlukta ağır ortam beslenmekte, ancak manyetitin doğal segregasyonu sonucu iki farklı yoğunlukta ayırım yapılabilmektedir.

Dünyada ve ülkemizde kullanımının yaygınlaşması beklenen üç ürünlü ağır ortam siklonlarının performansının belirlenmesi, teknik ve ekonomik açıdan önem arz etmektedir. Performans belirlemede ilk aşama ise malzeme balansının kurulmasıdır. Lave ve şist olarak iki ürün alınan klasik kömür yıkama cihazlarının aksine, üç ürünün alındığı bu sistemde malzeme balansının kurulması, ikinci üniteye beslemeden numune alınamadığı için, zor olmaktadır. Bunun üstesinden gelmek için genellikle iteratif yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Zonguldak ilinde kurulu olan ve bölge kömürünün yıkanmasında kullanılan ÜÜAOS performansı tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla sistemin belirlenen noktalarından, numune alma esaları göz önüne alınarak dört gün

boyunca bir saat aralıklarla temsili numuneler alınmıştır. Alınan numunelere boyut analizleri ve yüzdürme-batırma testleri yapılmış, buradan elde edilen her yoğunluk fraksiyonuna da elek analizi uygulanmıştır. Böylece farklı boyut ve yoğunluklarda elde edilen her bir ürünün kül ve kükürt değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler kullanılarak malzeme balansı oluşturulmuş ve cihaz performansını ortaya koymak amacıyla farklı boyutlar için Tromp eğrileri çizilmiş ve hata faktörleri (E_p) hesaplanmıştır.

Hata faktörleri LARCODEM için 0,032, ağır ortam siklonu için 0,053 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, genel olarak etkin bir ayırım yapıldığı ve cihaz performansının, özellikle LARCODEM ünitesi için, makul değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte ağır ortam siklonu ünitesi için beklenenden farklı bir durum gözlenmiştir. Boyut inceldikçe ayırma yoğunluğunun artması beklenirken, bu durum tersi yönde gelişmiştir. Beklenmeyen ya da alışılacak olmayan bu durum, ÜÜAOS geometrisi, malzeme balansı kurulması, AOS geometrisi ve kapasitesinin hesabı ve malzeme özellikleriyle ilgili gözlemlerle açıklanmıştır.

Genel olarak, çalışılan Zonguldak bölgesi kömürlerinin mikst oranının az, şist oranının ise çok yüksek olduğu, buna göre AOS dizaynının yetersiz kalabileceği yapılan değerlendirmelerle ortaya konulmuştur.

Yapılan tez çalışmaları sonucunda; ÜÜAOS'nun bir ağır ortam ayırma sistemi olması dolayısıyla, ayırma performansının yüksek olduğu, ancak, siklon performansının arttırılması ve mikste olan şist kaçaklarının azaltılması amacıyla özellikle mikst ürünü az ve şist ürünü çok fazla olan kömür örnekleri için standart bir Larcodems-AOS boyutlandırılması yerine, farklı opsiyonların kullanılması gerekliliği ortaya konulmuştur.

PERFORMANCE OF THE THREE PRODUCT DENSE MEDIUM CYCLONE AND ITS SIMULATION

SUMMARY

Coal provides more than 25% of the world's primary energy needs. 40% of world electricity is dependent on thermal coal while 70% of iron and steel production is achieved using metallurgical coal. In addition, coal is used in different industrial areas as an important component in the production of various special products. It is an inevitable necessity that the coal is washed and brought to the suitable properties for the usage area. For this purpose, a wide variety of methods and devices have been developed. Today, the process flowsheet of coal preparation plants has become standardized form to include two or more parallel circuits where coarse, medium, fine and very fine sized coals are washed through different separation devices. Coarse and medium sized coals are washed with heavy medium baths and cyclones. Spirals or water only cyclones are used to wash fine coals. Ultra fine coals especially in hydrophobic nature such as bituminous coals are beneficiated through flotation method.

Three product dense medium cyclones (TPDMC) provide some advantages such as simplification of this typical flowsheet commonly used in coal preparation plants, reducing maintenance and repair costs, and magnetite consumption. This device, which is widely used currently in the world, especially in China, has been used in various regions in Turkey. In addition, the device has been patented as “double roller dense medium separation system”. TPDMCs consist essentially of a dense medium vessel resembling a Larcodems and standard dense medium cyclone attached to Larcodems tailing discharge. The ROM coal is fed to the first separation unit Larcodems, where clean coal is obtained. The tailing of the first unit (heavy product-sink product) passes to the second separation unit, dense medium cyclone (DMC), where it is separated into middling and tailing. TPDMC can be operated with pump or gravity feed. A single density heavy media is fed to the system, but due to the natural segregation of magnetite, two different separation densities occur.

The determination of the performance of TPDMCs, which are expected to become widespread in the world and in our country, is technically and economically important. The first step for determining the performance of a separator or process is to establish a material balance. In contrast to the conventional coal washing devices in which two products are obtained as clean coal and tailing, it is difficult to establish the material balance in this system which three products are taken, since samples cannot be taken from the second unit. Density tracers can be used to overcome this challenge. They give precise results. However, if this is not possible, iterative methods may be used, or

a further products value such as sulphur or calorific value in addition to ash content may be used to establish a three-product balance.

Within the scope of this thesis, TPDMC performance, which was established in Zonguldak province and used for washing coals in that region, was tried to be determined. For this purpose, representative samples were taken from the determined points of the separation unit at one hour intervals for four days taking into consideration the sampling procedures. Sieve analysis and float – sink tests were performed on the samples. Thus, ash and sulfur values of each product obtained in different sizes and densities were measured. Material balances were created by using these measurements. After the determination of partitions, tromp curves were plotted for different sizes and Ecart probables (probable error) (E_p) were calculated to show the device performance.

Probable errors were calculated as 0.032 for Larcodems and 0.053 for dense medium cyclone. According to the results, an effective separation was made in general terms and the device performance was reasonable especially for the Larcodems unit. However, a different situation was observed for the dense medium cyclone unit than expected. While the separation density is expected to increase as the particle size becomes finer, it was found that appropriate separation conditions did not occur. This unexpected or unusual situation has been explained by observations and calculations of TPDMC geometry, material balancing, DMC geometry and spigot capacity, and material properties.

In general, it has been showed that the DMC design may be insufficient due to the low rate of middling and very high rate of tailing content of the Zonguldak coals studied.

As a result of the studies in this thesis; because TPDMC is a dense medium separation system, the separation performance is high. However, for a more efficient separation and recution of tailinig misplacing, the necessity of using different options rather than a standard Larcodems – DMC sizing has been demonstrated.

1. GİRİŞ

Kömür organik, norganik ve su(nem) dan meydana gelen heterojen bir malzemedir ve yapısında farklı köken ve miktarlarda inorganik maddeler içemektedir. Bunun yanısıra üretim esnasında kömüre yan kayaç, ağaç, demir, kağıt vb. parçalar karışmaktadır. Kömürün kül yapıcı bu maddelerden arındırılması için yapılan işlemler genel adıyla kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleridir [1,2,3]. Yüksek kaliteli kömür damarlarının azalması, artan mekanize kazı yöntemleri sebebiyle ince boyutlu kömür üretiminin artışı, yüksek taşıma maliyetleri, pazarın daha kaliteli kömür talebi ve çevre kirliliği kontrolleri sebebiyle kömür zenginleştirme işlemleri kritik öneme sahiptir [2].

Kömür zenginleştirme işlemleri yapıldığı ortama göre yaş ve kuru olmak üzere iki genel başlık altında toplanır. Uygulanacak yöntemin belirlenmesinde esas olarak kömürün tane boyutu ve yıkanabilirliği dikkate alınmaktadır. Günümüze kadar birbirinden farklı birçok cihaz ve yöntem geliştirilmiş olup bu yönde çalışmalar hala devam etmektedir. Ancak, ağır ortam ayırıcıları, sağladıkları yüksek ayırma performansı ve kapasite sebebiyle yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve ağır ortam ayırması ile kömür yıkama işlemleri standart hale gelmiştir.

Ağır ortam ayırıcılarının seçiminde en önemli husus malzemenin boyut dağılımıdır. Genel olarak iri boyutlarda ağır ortam tekne ve tamburları, ince boyutlarda ise ağır ortam siklonları tercih edilmektedir. Bu durum birbirine paralel çalışan devrelerin kurulmasını mecburi kılmaktadır. Ancak Çin’de yaygın olarak kullanılmakta olan ve ülkemizde de çeşitli bölgelerde devreye alınan üç ürünlü ağır ortam siklonları geniş boyut aralığındaki kömürü tek seferde yıkama imkanı sağlamaktadır. Bu sayede ilk yatırım ve işletme maliyetlerinde önemli ölçüde düşüş sağlanmaktadır [4].

Üç ürünlü ağır ortam siklonlarının sağladığı avantajların yanı sıra performanslı çalıştırılması tesis verimi ve ekonomisi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu ayırma ekipmanı performansı üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça kısıtlıdır. Dolayısıyla her ne kadar ayırma performansı yüksek olsa dahi, çalışma şartlarının optimize edilmesi ve farklı tür kömürlerin zenginleştirilmesinde performansının ne

şekilde değiştiğinin ortaya konması önemlidir. Performansın tespiti için öncelikle malzeme balansının kurulması gerekmektedir. Klasik iki ürün alınan sistemlerde her üründen numune alınabildiğinden bu işlem basit olmaktadır. Ancak üç ürünlü sistemde birinci siklonun (LARCODEM) atığı aynı zamanda ikinci siklonun (ağır ortam siklonu) beslemesi olduğundan buradan numune alınamamaktadır. Bu sebeple malzeme balansı ve dağılım eğrilerinin direkt olarak oluşturulması zorlaşmaktadır [5]. Dağılımın belirlenmesi için Jacobs ve Korte (2013) iteratif yöntemler kullanmıştır. Zhang (2015) ise pilot ölçekli çalışmasında yoğunluk izleyiciler kullanmıştır[6].

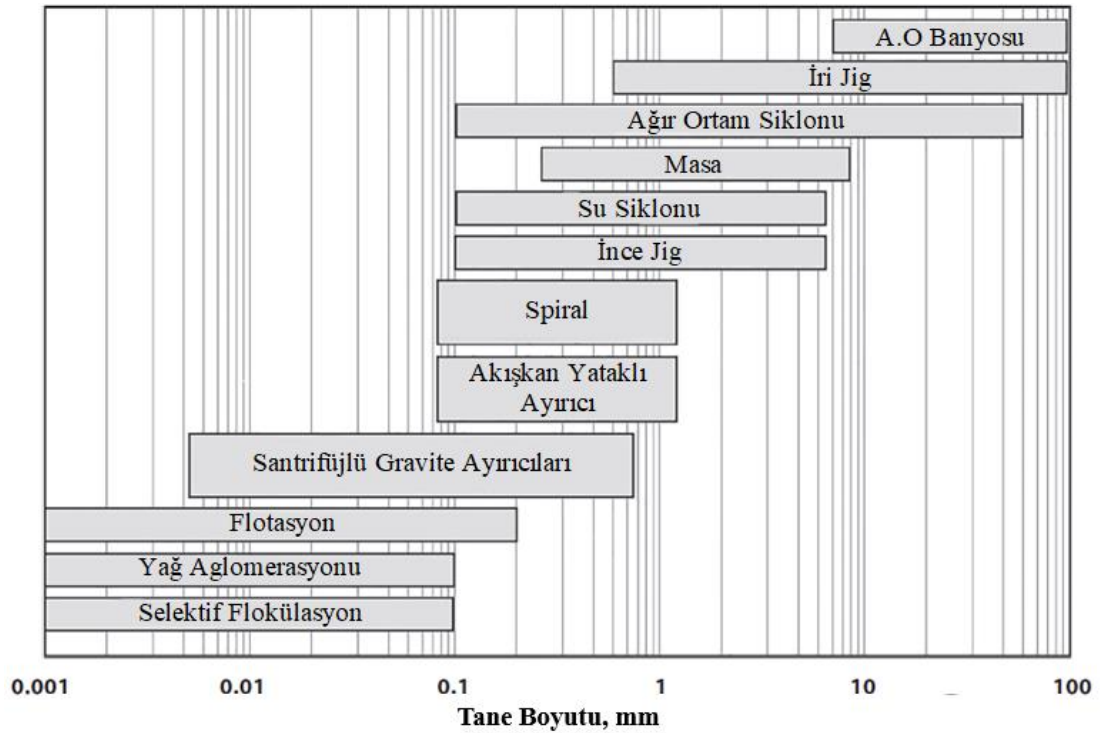
Bu tez kapsamında Zonguldak bölgesinde taşkömürünün yıkamasında kullanılan üç ürünlü ağır ortam siklonunun performansının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma hem saha hem laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri

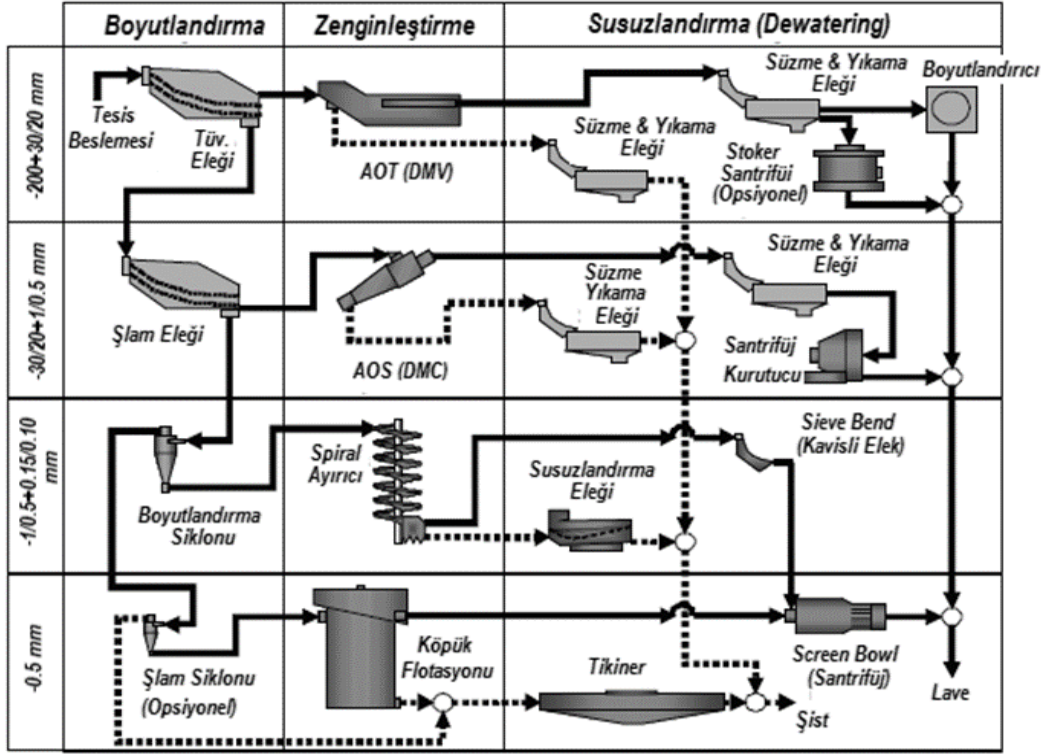
Kömür zenginleştirme işlemleri, zenginleştirmenin yapıldığı ortama göre yaş veya kuru olabilmektedir. Ortam olarak suyun kullanıldığı prosesler yaş proseslerdir ve kömür yıkama olarak adlandırılır. Ağır ortam ayırması, jig, spiral ve flotasyon en yaygın kullanılan yaş yöntemlerdir [2]. Ayırma ortamının hava olduğu prosesler ise kuru zenginleştirme olarak adlandırılır.

Ayırma yöntemi ve cihazın seçiminde teknik açıdan kömürün yıkanabilirliği ve tane boyutu önemlidir. Hiçbir cihaz kömürün bütün boyutlarını verimli ayıracak etkinlikte değildir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi her cihaz için belirli çalışma boyut aralığı vardır [2].



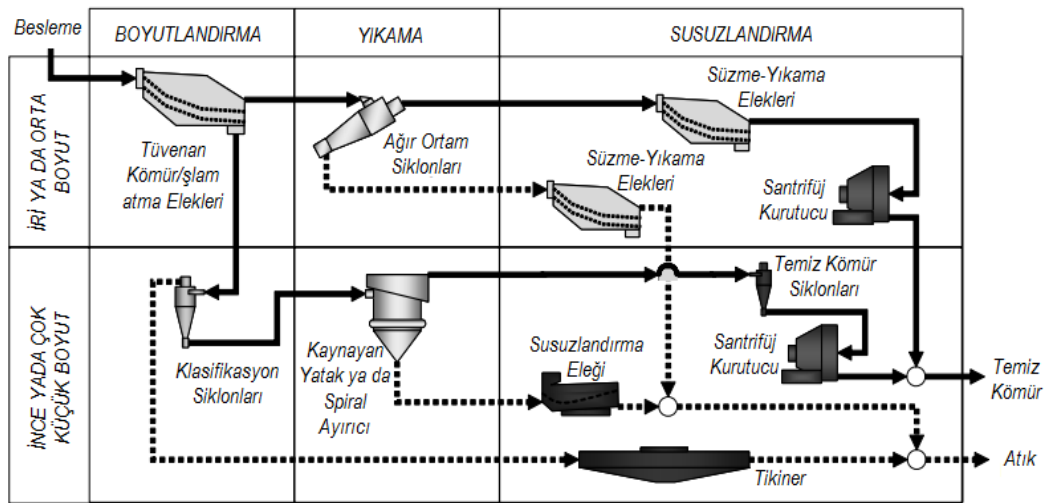
Şekil 2.1 : Başlıca kömür zenginleştirme işlemleri için tercih edilen tane boyut aralıkları.

Günümüzde saatlik kapasiteleri binlerce tona çıkan kömür hazırlama tesisleri, cevher zenginleştirme ve kimya proses endüstrilerindeki benzerleri kadar karmaşık ve işlevsel olabilmektedir. Şekil 2.2’de modern lavvarlar için genel ve basitleştirilmiş akım şeması görünmektedir [3].



Şekil 2.2 : Klasik kömür hazırlama tesislerinin akım şeması.

Bu akım şemasının gelecekte daha sadeleşerek şekil 2.3’e benzer hale geleceği düşünülmektedir[7].



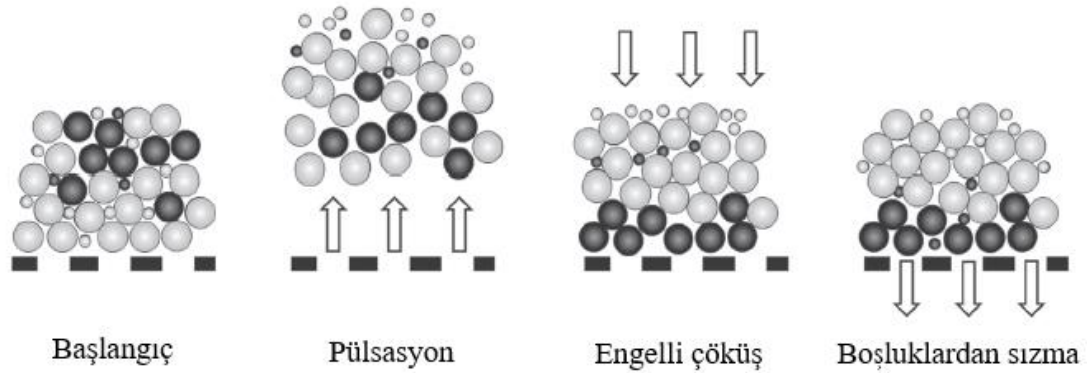
Şekil 2.3 : Gelecekte uygulanması düşünülen akım şeması.

2.1.1 Yaş Yöntemler

2.1.1.1 İri ve orta boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesi

Jig

Jigler -300+2 mm boyut aralığında çalışan ve kapasiteleri 700 t/s'e kadar çıkabilen, en eski kömür yıkama yöntemlerinden biridir. Yeni geliştirilen jig dizaynları ile alt çalışma boyutu 0,25 mm'ye kadar indirilmiştir; ancak ayırma yoğunluklarında önemli değişimlerin olduğu söylenmektedir [8]. Jiglerin çalışma prensibi sulu bir ortamda emme-basma (pülsasyon) hareketi ile bir yatak üzerinde hafif olan kömürün üst kısımdan, ağır olan yan taşının ise alt kısımdan alınmasına dayanır. Jiglerde tabakalaşmayı sağlayan etkenler şekil 2.4'de verilmiştir [9].



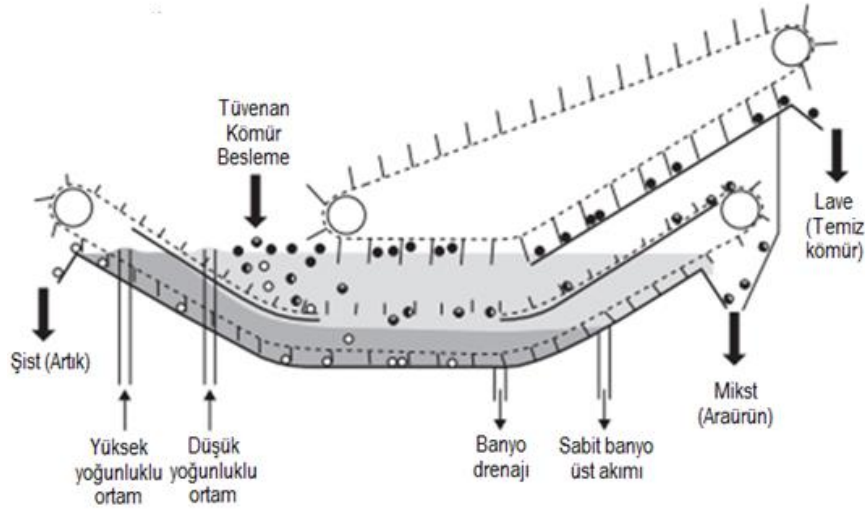
Şekil 2.4 : Jigde tabaka oluşumu.

Hava pülsasyonlu Baum ve Batac jigleri kömür zenginleştirme yaygın olarak kullanılmaktadır. Jigler genellikle yakın yoğunluktaki malzeme miktarının %10'dan az olduğu durumlarda tercih edilir. Ağır ortam sistemlerine göre daha düşük yatırım ve işletme maliyetlerine sahiptir [9,10].

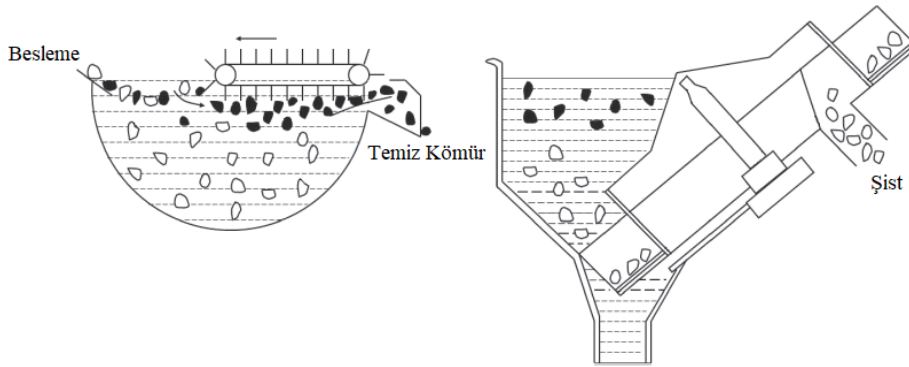
Ağır Ortam Yöntemi

Ağır ortam yöntemi, kömür ve yantaşı arasında hazırlanan ara yoğunluktaki bir ortamda yüzen ürün olarak lave, batan ürün olarak şistin alınması prensibiyle çalışmaktadır. Kömür yıkamada manyetitinin ağır ortam olarak kullanımı 1922 yılına dayanmaktadır. Ancak endüstriyel uygulamaların başlaması 1940'ların başını bulmaktadır. 1960'larda Dyna Whirlpool ve Vorsyl; 1970'lerde Tri-Flo dinamik ayırıcıları geliştirilmiştir. 1992 yılında ilk kez 1000 mm çapından büyük ağır ortam siklonları kullanılmış, günümüzde ise 1500 mm çapında siklonlar devreye alınmaktadır [3].

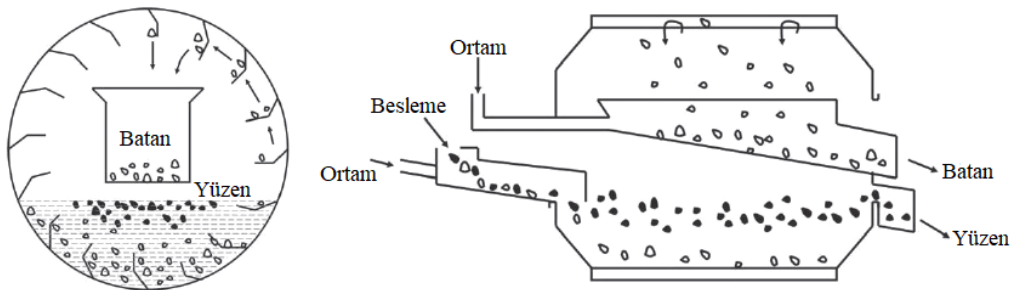
Ağır ortam ayırıcıları ortamın durumuna göre statik veya dinamik olarak sınıflandırılır. Statik ayırıcılarda 3 mm tane boyutuna kadar efektif ayırma yapılırken, dinamik ayırıcılarda santrifüj kuvvetinin etkisiyle bu boyut 0.1 mm'ye kadar inebilmektedir [11]. Şekil 2.5, 2.6 2.7 ve 2.8'de bazı statik ağır ortam ayırıcıları görünmektedir [2].



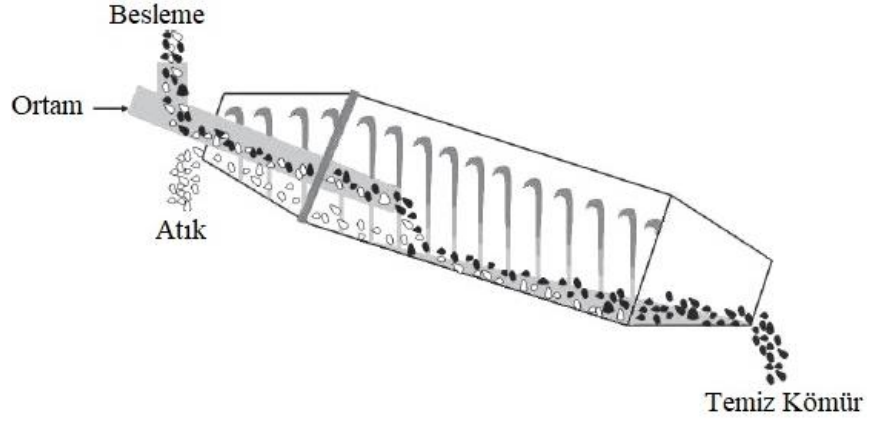
Şekil 2.5 : Tromp banyosu.



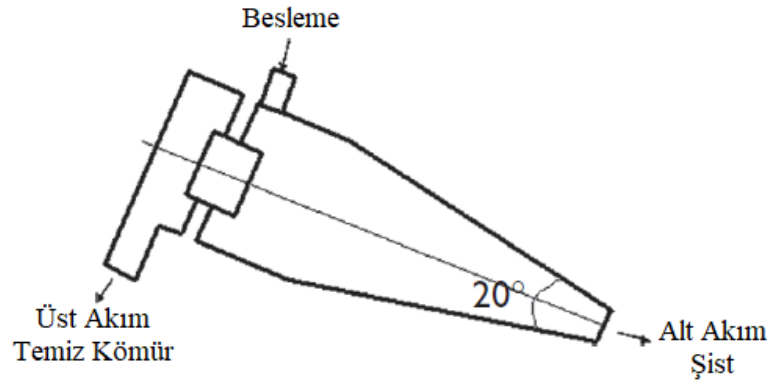
Şekil 2.6 : Drewboy ayırıcı.



Şekil 2.7 : WEMCO tamburu.



Şekil 2.8 : Varil yıkayıcı.



Şekil 2.9 : Ağır ortam siklonu.

2.1.1.2 İnce ve çok ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesi

İnce kömürlerin zenginleştirilmesinde en önemli gelişmelerden biri 1980'lerde kömüre yönelik spirallerin geliştirilmesidir. Genellikle 0.5 mm'ye kadar ağır ortam ayırması, 0.5 mm'nin altında ise flotasyon uygulamaları yapılırken, 0.1-2 mm arası kömürlerin yıkanması için spiral devreleri kurulmuştur. Dünya genelinde işlenen kömürün yaklaşık %12'sinin spiraller ile yıkandığı, bunun da ince kömür temiz teknolojileri arasında ilk sırada olduğu tahmin edilmektedir [8].

Su siklonları Dutch State Mines (DSM) tarafından geliştirilen ve 1950'lerden bu yana ince kömürlerin yıkanmasında kullanılan teknolojilerden bir diğeridir. Düşük yatırım maliyetleri, basit yapı ve ortam olarak su kullanılmasından dolayı su siklonlarının (WOC: water Only Cyclone, tıbbi siklon olarak da adlandırılabilir) kullanımı devam etmektedir. Su siklonlarında hata faktörü 0.2'nin üzerindedir ve iri boyutlu kömür atığa kaçabilmektedir. Bu sebeple kaba+süpürme devresinde su siklonu kullanılacak şekilde akım şeması oluşturulmakta veya su siklonunun alt akımı spirallerde yıkanmaktadır [8].

Özellikle son 15 yılda kullanımı yaygınlaşan teknolojilerden biri de akışkan yataklı ayırıcılarıdır. Bu cihazlar tipik olarak içinden yıkama suyunun enjekte edildiği üstü açık haznelerdir. Kaynayan yatak ya da engelli yatak ayırıcıları olarak da adlandırılmaktadır. Yüksek kapasiteleri, düşük ayırma yoğunlukları ve etkin ayırma yapabilmesi gibi avantajlarının yanı sıra beslemede iri boyut kontrolünün yapılması kömür kayıplarının önlenmesi açısından önem arz etmektedir. Akışkan yataklı ayırıcılar daha çok spirallerin yerine kullanılırken, spiraller ile birlikte kullanımı da mevcuttur [8].

Çok ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde flotasyon en etkili ve ekonomik yöntemlerden biri olarak kabul edilir. Kömür ve şistin yüzey özellikleri farkından yararlanılarak yapılan bir işlemdir. Kömür zenginleştirmede kullanılan flotasyon makinelerinin büyük çoğunluğu mekanik hücreler olmakla beraber flotasyon kolonları gibi farklı tipte cihazlar da kullanılmaktadır.

2.1.2 Kuru yöntemler

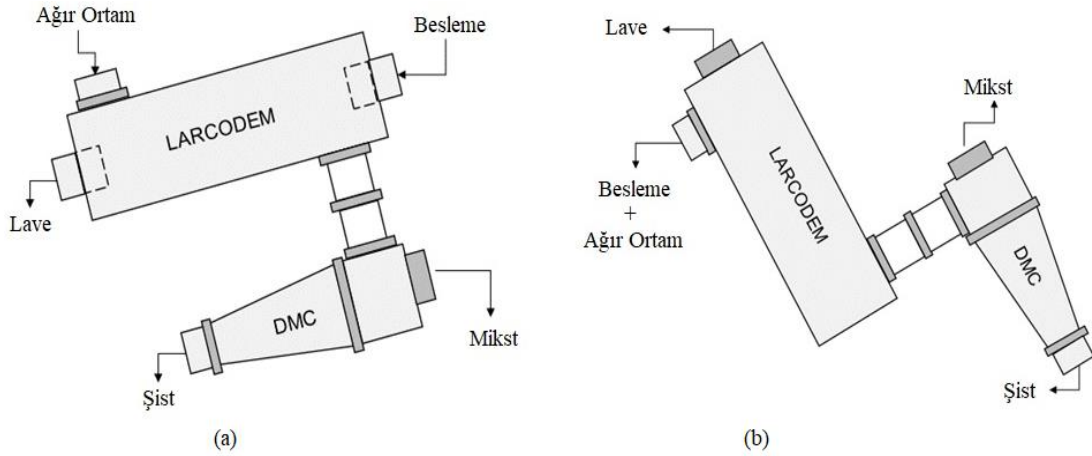
Kömürün kuru zenginleştirmesinde yantaşı ile arasındaki yoğunluk, kırılgenlik, renk gibi fiziksel özellikleri dikkate alınır. Yaş ayırmaya kıyasla daha düşük ayırma verimlerine sahip olmasına rağmen, düşük kurulum ve işletme maliyetleri ve olumsuz çevresel etkileri azaltması gibi avantajlara sahiptir [11]. Yaş yöntemlerde suyun getirdiği maliyetler olmamakta, susuzlandırma birimlerine veya büyük atık barajlarına gerek kalmamaktadır. Bunlara ilave olarak, suya ulaşımın sıkıntılı olduğu kurak bölgelerde veya kışın sert soğukların suyun donmasına sebep olduğu bölgelerde de yaş zenginleştirme uygulamaları daha zor olmaktadır. Kuru ayırma yöntemleri özellikle sınırlı oranlarda iyileştirme gerektiği durumlarda veya yaş zenginleştirmeden önce yantaşın uzaklaştırılmasında (De-stoning: taş atma) tercih edilmektedir. Elle ayıklama, bradford kırıcısı, havalı masalar, havalı jigler, FGX ayırıcı, optik ve x-ray ayırıcılar ile manyetik ve elektrositatik ayırıcılar kuru ayırmada kullanılan bazı cihaz ve yöntemlerdir [2, 8, 11-14].

2.2 Üç Ürönlü Ağır Ortam Siklonları

Üç ürönlü ağır ortam siklonları (ÜÜAOS) ilk olarak Rusya'da şlamı atılmış kömürlerde uygulanmıştır. Ancak tasarımın geliştirilmesi ve yaygın olarak kullanımı Çin'de gerçekleşmiştir. Yerçekimi beslemeli modeli Çin'de 600'den fazla tesiste

kullanılmaktadır [15]. Yalnızca *Guohua Technology Co.* firmasına ait 3GDMC serisi üç ürünli ağır ortam siklonları, Çin’de kok kömür pazarının %60’dan fazlasına denk gelen, 330’dan fazla kömür hazırlama tesisinde çalıştırılmaktadır [16].

Üç ürünli ağır ortam siklonları Larcodem ayırıcı benzeri silindirik bir ağır ortam teknesi ve bu ilk ünitenin atık çıkışına bağlı klasik bir ağır ortam siklonundan oluşmaktadır. Sistem şekil 2.10 (a) ve (b) görüleceği gibi gravite beslemeli veya pompa beslemeli olarak dizayn edilebilmektedir. Gravite beslemeli sistemde ağır ortam ve kömür birbirine ters akımlı olarak farklı yerlerden beslenmektedir. Pompa beslemeli sistemde ise kömür ve ağır ortam karıştırılarak aynı noktadan teğetsel olarak besleme yapılmaktadır.



Şekil 2.10 : Graviye beslemeli (a) ve Pompa beslemeli (b) üç ürünli a.o.s.

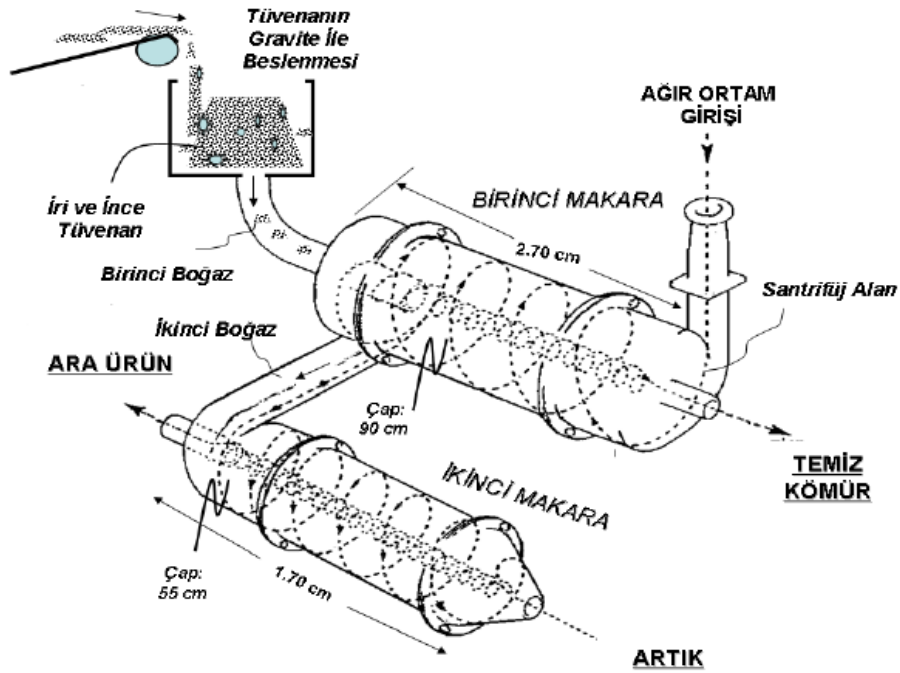
ÜÜAOS’da sisteme tek yoğunlukta ağır ortam beslenmekte; ancak manyetitinin doğal segregasyonu sonucu Larcodem ayırıcısının temiz kömür çıkışında ortam yoğunluğu beslenen ortamın yoğunluğundan düşük, atık çıkışında ise ortam yoğunluğu, beslenen ortam yoğunluğundan daha yüksektir. Bu davranış ortam stabilitesi olarak tanımlanmakta olup, optimum ayırma şartları için siklon alt ve üst akım ortam yoğunlukları arasındaki farkın 0.1-0.4 arasında olması beklenmektedir. Dolayısıyla ÜÜAOS ilk ayırıcısına beslenen ortam yoğunluğu ikinci üniteye aktarılırken 0.1-0.4 g/cm³ oranında artış gösterir. Bu sayede tek bir yoğunluk kullanarak iki farklı yoğunlukta ayırma yapmak ve lave, mikst ve şist olmak üzere üç ürün elde etmek mümkündür [17].

Günümüzde kömür hazırlama tesisleri standart hale gelmiş olup hemen hemen tüm kömür hazırlama tesisleri, kömürün kolay/zor yıkanabilirliğine bakılmaksızın ağır

ortam ayırması uygulamaktadır. Öyle ki ülkemizde kısa zaman öncesinde kolay yıkanabilir kömürler için jig ayırması uygulanırken günümüzde jig ile yıkayan 1 adet kömür hazırlama tesisi kalmıştır (Zonguldak Bölgesi). Çin’de 1980 yılında ağır ortam yönteminin kullanımı %17 dolaylarında iken bu oran 2010 yılında %61’lere kadar çıkmıştır [18]. Avustralya da ise tesislere beslenen kömürün %60-85’i ağır ortam siklonları ile yıkanmaktadır [8]. ÜÜAOS ise bu yöntemde kullanılan cihazlar arasında yeni trenddir ve modern kömür hazırlama tesislerinde tercih edilen seçenektir. Cihazın tarihsel gelişimi aşağıdaki şekildedir [5,15];

- 1979 yılında pompa beslemeli üç ürlü ağır ortam siklonlarının geliştirilmesi için Çin Kömür Araştırma Enstitüsü bir araştırma gurubu kurmuştur.
- 1984 ve 1989 yıllarında 500/350 ve 710/500 mm boyutlarında ÜÜAOS’lar geliştirilmiş ve uygulamaya alınmıştır.
- 1992 yılında 700/500 mm boyutunda iki ünitesi de silindirik olan ve gravite ile besleme yapılan ÜÜAOS denenmiş ve patenti alınmıştır.
- Aynı dönemlerde İngilterede de 500 mm çaplı ve her iki ünitesi de silindirik olan ÜÜAOS ile çalışmalar yapılmıştır [17].
- 1995 yılında gravite beslemeli ve 700/500 mm boyutunda, ilk ünitesi silindirik, ikinci ünitesi silindirik-konik olan cihaz test edilmiş böylece gravite beslemeli ÜÜAOS’un temel yapısı oluşturulmuştur.
- 1999 yılında 1200/850 mm boyutunda gravite beslemeli cihaz devreye alınmıştır; ancak siklonda aşınma sorunu ve ikinci ünitenin yoğunluğunu ayarlama da problemler yaşanmıştır.
- 2000 yılında aynı tesiste aynı boyutlarda geliştirilmiş bir cihaz kullanıldı ve daha uzun ömürlü olduğunu kanıtlamıştır.
- 2003’te 1300/920 boyutunda 2004’te ise 1400/1000 boyutunda cihazlar devreye alınmış ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.
- 2008 yılında 1500/1000 mm boyutunda cihazın testleri yapılmış ve başarılı olduğu görülmüştür [16].
- Günümüzde ise ilk ünitesi 1600 mm çaplı cihazların geliştirildiği ifade edilmektedir [20].

ÜÜAOS ülkemizde de farklı tipte kömürlerin yıkanmasında kullanılmaktadır. Zonguldak, Tekirdağ, Balıkesir ve Manisa bölgelerinde taşkömürü veya linyitlerin yıkanması amacıyla toplamda 6 adet tesiste kurulmuştur. Ayrıca Karbomet Madencilik tarafından “Çift Makaralı Ağır Ortam Ayırma Sistemi (ÇMS)” adıyla patenti alınmıştır. ÇMS’de malzeme birinci üniteye gravite ile beslenmektedir. Çalışmanın alt sınır boyutu 0,5 mm önerilmekle beraber, kullanılacak süzme-yıkama ve susuzlandırma eleklerinin açıklığı 0,1 mm olduğu takdirde bu boyutta da çalışılabileceği belirtilmiştir [4]. Şekil 2.11’de ÇMS’nin şematik görünümü verilmiştir. Hacıfazlıoğlu ve diğ. (2010) ÇMS ile yaptıkları çalışmada 900/550 mm çaplı cihazda eğim, kömür besleme miktarı, besleme boyutu, ağır ortam besleme basıncı gibi parametreleri denemiş ve 49,10 küllü Zonguldak kömüründen, yüksek yıkama verimiyle 7,10 küllü lave elde ettiklerini, ayrıca %85 küllü bir atık atıklarını ifade etmişlerdir [21].



Şekil 2.11 : 900/550 mm ÇMS'nin şematik görünümü.

Üç ürünli ağır ortam siklonları geniş boyut aralıklarında çalışabilmesi ve tek yoğunlukta ağır ortam kullanarak iki farklı yoğunlukta ayırım yapabilmesi sebebiyle bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Klasik kömür hazırlama tesislerinde farklı boyut aralığındaki kömürlerin yıkanması için farklı ayırıcıların kullanımı gerekmektedir. Bu durum ana ekipman sayısını artırmakla beraber, elekler, pompalar, bantlar vb. ekstra

yardımcı ekipman gereksinimini de artırmaktadır. ÜÜAOS'nun kullanımı ile geniş boyut aralığındaki kömürler tek seferde yıkanabilmekte, böylece fazladan yardımcı ekiptan ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Tesis dizaynı daha basit olmakta, ihtiyaç duyulan alan da azalmaktadır. Benzer işi yapan bir kömür yıkama tesisine göre, üç ürünlü sistemin kullanıldığı tesislerde ilk yatırım ve işletme maliyetleri bu şekilde %20-50 oranında azaltılabilmektedir [4,19,21,22,25].

- Üç ürünlü ağır ortam siklonlarıyla şlam uzaklaştırmaya gereksinim olmadan çalışılabilmesi sayesinde, ince kömür temizleme devresi elimine edilebilir [4, 19,22]. Liu ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada 710/500 mm boyutunda üç ürünlü cihazda, 0,75 – 0,125 mm boyutunda kömürün zenginleştirilmesinde yalnızca Larcodem ünitesinin performansını incelemiştir. Yüksek miktarda yakın yoğunlukta malzeme içeren bu kömürde cihazın E_p değeri 0,054 olarak bulunmuştur [23]. Zhang (2015) ise yaptığı yüksek lisans çalışmasında pilot ölçekli ÜÜAOS'nda şlam miktarının performans etkisini incelemiş, şlam miktarının yoğunluk kaymalarını azalttığını ve E_p değerlerinde belirgin bir değişikliğe sebep olmadığını vurgulamıştır [5]. Ayrıca ince boyutta kömürleri yıkamak için, klasik ağır ortam ayıcılarının aksine, ultra ince boyutlu manyetit gereksinimi de ortadan kalkmaktadır. Normal özelliklerde manyetit ile ince kömürler de efektif olarak ayrılabilir [24].
- Gravite beslemeli sistemde, pompa kullanılmadığından dolayı, ufalanma ve ikincil şlam üretimi %5-7 oranında azalmaktadır [5, 19]. Bu sayede hem kömürün yüzey nemi azalmakta hem de temiz kömürün kalorifik değerinde önemli artışlar sağlanabilmektedir [22]
- Düşük yoğunlukta ağır ortam hazırlayarak yüksek ayırma yoğunluklarına çıkılabilmesi, özellikle zor yıkanabilir kömürlerde, temiz kömür verimini artırmaktadır [19,22,24].
- Tek ve düşük yoğunlukta ağır ortam hazırlanması ve ikincil şlam üretiminin azaltılması sayesinde manyetit sarfiyatında önemli düşüşler sağlanabilmektedir. Çoğu ince boyutlu ve zor yıkanabilir olan Çin kömürleri için üç ürünlü sistem kullanılan yaklaşık 500 tesiste ortalama manyetit sarfiyatının 0,5 kg/t olduğu ifade edilmiştir [5].

2.3 Performansa Etki Eden Parametreler

İdeal bir kömür hazırlama prosesinde, yoğunluğu ortam yoğunluğundan düşük olan tanelerin temiz kömürde, yüksek olan tanelerin ise şistte toplanması beklenir. Böyle bir durumda elde edilecek ürünlerin miktar ve kalitesi, yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen sonuçlarla birebir aynı olacaktır. Ne var ki uygulamada hatalı ayrılan malzemelerden dolayı ayırım hiçbir zaman ideal sonuçlarda gerçekleşmez ve %100 performansa ulaşılmaz. Ağır ortam siklonlarında performansı etkileyen birçok faktör vardır. Bunları ağır ortam özelliklerinin etkisi ve çalışma koşullarının etkisi olarak iki başlığa ayırmak mümkündür.

2.3.1 Ağır ortam özelliklerinin siklon performansına etkisi

Ağır ortamın boyut dağılımı

Ağır ortam siklonlarında ayırma etkinliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri manyetit tanelerinin boyutudur [10]. Genel olarak manyetit içerisinde ince miktarının artması performansı olumlu yönde etkiler [26]. Kömür hazırlamada genellikle B sınıfı yani %90'ı 45 mikron altında olan manyetit tercih edilir [8,25]. Yüksek ortam yoğunluklarında çalışıldığında daha iri boyutta manyetit de kullanılabilir [27]. Fourie ve diğ. (1980), 0,5 mm altındaki kömürlerin ağır ortam siklonlarıyla efektif bir şekilde ayrılabilmesi için manyetitin en az %50'sinin 10 mikronun altında olması gerektiğini belirtmiştir. Ancak bu durumda ağır ortamın geri kazanımında sorunlar ortaya çıkacaktır [28].

Sistemde devirdaim eden manyetitin boyut dağılımı, yeni beslenen manyetit ile her zaman aynı olmayabilir. Özellikle ince boyutlu manyetitin süzme-yıkama eleklerinde veya manyetik ayırıcıda kaybedilmesi sonucu, ortamdaki manyetit kompozisyonu irileşebilir. Bu durumda ayırma yoğunluğu ve etkinliği düşecektir. Esasen bu iki etki temiz kömürün külü açısından düşünüldüğünde önemli bir değişikliğe sebep olmayacaktır. Ancak verimde düşüşler meydana gelecektir [10,25].

Ağır ortamın kontaminasyonu

Ortam kirlenmesi, viskozite ve stabilite açısından önemlidir ve performansı olumsuz yönde etkiler. Kontaminasyon genellikle ortam malzemesi içinde 600 mikrondan küçük boyutta non-manyetik malzemelerin oranı olarak ifade edilir ve buna bağlı

problemlerin önüne geçmek için ağırlıkça %7'den az olması istenir [25]. Ağır ortam viskozitesinin aşırı artmasının sebebi çoğunlukla, ortamda ultra ince boyutlu kömür veya kil tanelerinin bulunmasıdır. Benzer miktarlarda kil kontaminasyonu kömür kontaminasyonuna oranla daha büyük etkiye sahiptir. Düşük ortam yoğunluklarında tolere edilebilir kirlilik miktarı yüksek yoğunluklara göre daha fazladır. Manyetit-kömür kirlenmesi için maksimum kabul edilebilir katı hacmi ortamda yaklaşık %30 iken, manyetit-kil için %25 civarındadır [10].

Ortam reolojisi

Ortam reolojisini tanımlamak ve performans ile ilişkisini ortaya koymak amacıyla genellikle görünür viskozite ifadesi kullanılır. Viskozite tanelerin akışkan ortam içerisindeki hareketine karşı direnç olarak tanımlanır. Ortamda ince boyutlu manyetitin kullanılması veya kil kontaminasyonu viskoziteyi artırmaktadır. Ortam viskozitesi arttıkça kesme yoğunluğu azalmakta ve çok yüksek değerlerde ortam yoğunluğuna yaklaşmaktadır [27]. Viskozitenin artmasıyla E_p değeri de artmakta ve performans azalmaktadır. İnce boyutlu kömürlerin ortam içinde doğru konumlanmasında viskozitenin etkisi fazladır. İri boyutlarda ise viskozite ilk etken değildir [8,29]. Beslenen ortam yoğunluğu sabit kaldığında, viskozitenin artmasıyla birlikte alt akım yoğunluğu artmakta üst akım yoğunluğu ise azalmaktadır [30]. Bu değişim ortam stabilitesi ile de yakından ilişkilidir. He ve Laskowski (1993), $1,5 \text{ g/cm}^3$ 'ten yüksek ayırma yoğunluklarında, ortam reolojisinin performansı belirlemede baskın etken olduğunu ve bu yoğunluklarda iri boyutta manyetit kullanılarak performansın artırılabilceğini ifade etmişlerdir [31].

Ortam stabilitesi

Viskozite akmaya karşı direnç anlamına gelirken, stabilite ise çökmeye karşı direnç olarak düşünülebilir. Ortam stabilitesi, ortamı oluşturan katıların yerçekimi altında çökme hızının tersi olarak tanımlanır [32]. Ağır ortamın stabilitesi, alt akım ve üst akım yoğunlukları arasındaki farka bakılarak kontrol edilebilir. Aynı ortam yoğunluğu için, stabil olmayan ortamda ayırma etkinliği, stabil ortama göre daha düşük olmaktadır. Alt akım ve üst akım arasındaki yoğunluk farkının iyi bir ayırma için $0,2 - 0,5 \text{ g/cm}^3$ arasında olması gerekmektedir [8,30]. Yakın yoğunluktaki malzemelerin doğru ayrılması için bu farkın düşük olması istenir. Bu tür kömürler için $0,25 - 0,30 \text{ g/cm}^3$ aralığında yoğunluk farkı önerilmiştir [33]. Yoğunluk farkının, olması gerekenin

üzerinde bir değer aldığında, özellikle yakın yoğunluktaki malzemelerin kalma süresi artacaktır (“Retention”-“Hangout” olarak ifade edilir). Uzun kalma süresi ara ürün karakterindeki kömürlerin ufalanıp serbestleşmesini artırarak iyi sonuç verebilir; ancak aşırı yığılma sonucu tıkanmalar meydana gelir ve biriken malzeme periyodik olarak alt akımdan boşalır (“Surge” olarak ifade edilir). Bu boşalma sırasında düşük yoğunluktaki kömürlerden de alt akıma kaçak olur [8,25]. Ortam stabilitesi aynı zamanda kesme yoğunluğu kaymasını (“density offset”-“cut point shift” olarak ifade edilir) da değiştirerek performansa etki etmektedir. Sabit bir ortam yoğunluğunda kesme yoğunluğu kayması, ortam stabilitesinin artmasıyla azalmakta ve ortam stabilitesi yüksek seviyelere geldiğinde sıfırlanmaktadır [30]. Ortam stabilitesinin derecesi, devirdaim eden ortam yoğunluğu ile üst akım yoğunluğu farkının, ortam yoğunluğuna oranı olarak da ifade edilebilir. Bu oranın %3-12 arasında olması istenir [34]. O’Brien ve diğ.(2014), ortam yoğunluğunun 1,4 g/cm³’den büyük olduğu durumlarda stabilitenin önemli bir problem olmadığını ancak bu değer altına inildikçe öneminin yükselerek arttığını belirtmişlerdir [35].

2.3.2 Çalışma koşullarının siklon performansına etkisi

Besleme boyutu

Bütün gravite ayırıcılarında olduğu gibi, besleme tane boyutu ayırma etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Boyut azaldıkça tanelerin ortam içerisindeki hareket hızı azalmakta, kalma süreleri artmakta ve doğru akıma yönelmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeble ince kömür zenginleştirme işlemlerinde, giriş basıncı artırılarak veya siklon çapı azaltılarak, yüksek santrifüj kuvveti elde edilmelidir [31]. Yaklaşık olarak 2 mm’nin altındaki boyutlarda ortam özelliklerinin ayırma performansına etkisi oldukça yüksektir. Daha iri boyutlarda ise bu etki ihmal edilebilir düzeydedir [27, 29, 36]. Genel olarak tane boyutu azaldıkça E_p değeri exponansiyel olarak artmaktadır [28]. Kritik bir boyuttan sonra ise E_p ’deki artış çok keskin olmaktadır. Bu boyut *breakaway boyutu* olarak ifade edilir [26]. Bu boyutlarda aynı zamanda kesme yoğunluğu kaymaları da daha yüksektir.

Besleme basıncı

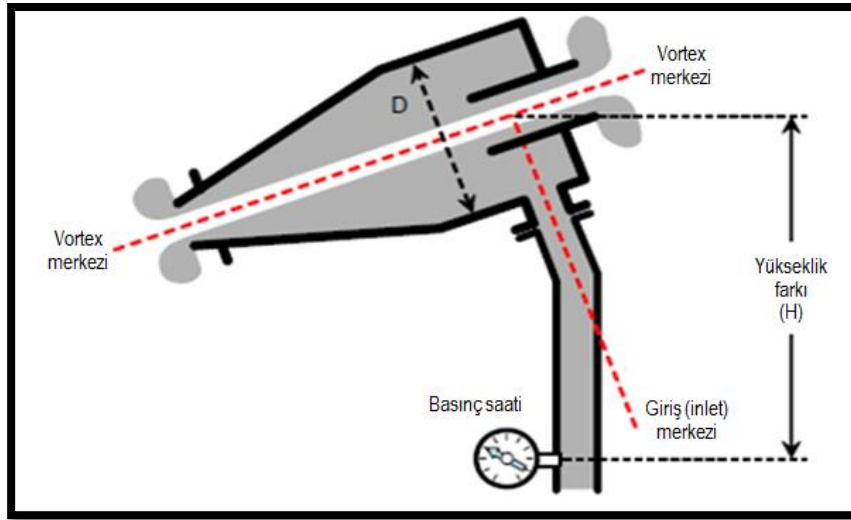
Taneler üzerine etkiyecek olan santrifüj kuvveti besleme basıncı ile yakından alakalıdır. İyi bir ayırma için giriş basıncı genellikle siklon çapının en az 9 katı olması gerekir [8,25, 26].

$$P_{gmin (kPa)} = [9 * D(cm) + H(cm)] * \frac{SGm(\frac{g}{cm^3}) * g(\frac{cm}{s^2})}{10000} \quad (2.1)$$

Besleme basıncının belirli bir noktaya kadar yükselmesi performansı olumlu yönde etkilemektedir. Ancak ortamdaki manyetit de segregasyonuna sebep olabileceği için çok yüksek basınçlar olumsuz yönde etki eder. Busebeple maksimum besleme basıncı optimum ayırma şartları açısından siklon çapının 12 katı ile sınırlı tutulmaktadır.

$$P_{gmaks (kPa)} = [12 * D(cm) + H(cm)] * \frac{SGm(\frac{g}{cm^3}) * g(\frac{cm}{s^2})}{10000} \quad (2.2)$$

Burada P_g minimum ve maksimum besleme basıncını, H basınç ölçümü için sisteme yerleştirilen manometrenin siklon merkezine olan mesafesini, SGm , devirdaim eden ortam yoğunluğunu, g , yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Şekil 2.12’de basıncın hesaplanmasıyla ilgili şematik çizim görünmektedir.



Şekil 2.12 : Siklonlarda basıncın hesaplanması.

ÜÜAOS uygulaması için maksimum besleme basıncı siklon çapının 15 katına kadar çıkarılabilmektedir. Ağır ortam hazırlamak için ince boyutlu manyetitler kullanıldığı takdirde stabilite problemi azalacağından daha yüksek besleme basınçlarına çıkılabilir

[27]. Olması gerekenden daha düşük besleme basıncında ortamın büyük kısmı alt akıma gidecektir. Bu durum ince boyutlu kömürler ile yakın yoğunluktaki kömürlerin şiste kaçma ihtimalini artıracaktır [25]. Besleme basıncının artması aynı zamanda siklon besleme kapasiteni de yükselmektedir. Fakat bu durumda aşınmalar da artmaktadır.

Hacimsel ortam/kömür oranı

Siklon beslemesinde hacimsel olarak optimum ortam/kömür oranı genellikle 3:1 – 5:1 aralığındadır. Peatfield (2003) ise yakın yoğunluktaki malzeme miktarı düşük olan kömürler için ortam/kömür oranının 2,5:1 olabileceğini söylemiştir [37]. Meyers ve diğ.’ne göre (2014), bu oranın siklon performansına etkisi, besleme basıncının etkisinden daha fazladır [38]. Beslemede olması gerekenden düşük ortam/kömür hacmi oranı, siklon kapasitesini arttırsa da, kömür tanelerinin ayırma ortamı içerisinde aşırı kalabalıklaşmasına ve ayırma etkinliğinin hızla bozulmasına sebep olur. Daha yüksek oranlarda ise performansta önemli bir değişiklik olmamakla birlikte, pompa ve siklonlarda aşınmalar artmaktadır. Aynı zamanda süzme-yıkama elekleri ve manyetik ayırıcının da yükü artacağı için manyetik kaybı artabilmektedir [8,10]. Beslemedeki ortam/kömür oranını belirlemek daha kolay olsa da, etkin bir ayırma açısından ürün çıkışlarındaki oran daha önemlidir. Özellikle, üst akım çıkışlarında hacimsel ortam/kömür oranının düşük olması dolayısıyla, girdap bulucunun (vortex finder) aşırı yüklenmesi, sonucu önemli miktarda temiz kömür şiste kaçabilir. Dağılım eğrilerinde düşük yoğunluklarda, Tromp eğrisinin alt kısmının (kuyruğun) sifıra ulaşmaması çoğunlukla bununla alakalıdır. Bu problemin önüne geçmek için üst akımda hacimce ortam:kömür oranını 2,5’in üzerinde tutmak gerekmektedir. Oran istenilenden daha düşükse, ortam miktarı veya besleme basıncı artırılabilir, kömür tonajı veya apex çapı düşürülebilir [25,39]. Alt akım çıkışında ise apex’in aşırı yüklenmesini önlemek için Wood (1990) tarafından hacimce ortam/kömür oranının 1,5’den fazla olması önerilmiştir [39]. Meyers ve diğ (2014) ise yakın yoğunluktaki malzeme miktarı fazla olan ayırmalarda en 2,5 olması gerektiğini belirtmiştir [38]. Olması gerekenden düşük ortam/kömür oranı alt akım çıkışının “ip”leşmesine (roping) sebep olmaktadır. “İp”leşmenin başladığı nokta spigot kapasitesini göstermektedir ve bu noktadan sonra kömür beslemesindeki artış spigota gelen yükü değiştirmeyecektir. “Roping” durumunda şist taneleri gelişigüzel olarak hareket etmekte ve temiz kömüre kaçaklar olmaktadır [40,41].

Siklon dizayn parametreleri

Temel siklon dizayn parametreleri siklon giriş – çıkış çapları ile koniklik açısıdır. Çizelge 3.1’de Deutch State Mines (DSM) siklonlarının standart ölçüleri verilmiştir [8]. Birçok siklon üreticisi halen bu oranlara bağlı kalmaktadır; ancak yüksek kapasitelere, yüksek besleme boyutlarına ve yüksek miktarda şist içeren kömürlerin zenginleştirilmesine duyulan ihtiyaçtan dolayı bu oranlar değişebilmektedir [26].

Çizelge 2.1 : DSM standart siklon ölçüleri.

Giriş çapı	0,15-0,25 x siklon çapı
Girdap bulucu (vortex finder) çapı	0,43-0,5 x siklon çapı
Spigot (apex) çapı	0,3-0,4 x siklon çapı
Silindirik kısım uzunluğu	0,5 x siklon çapı

Siklon çapının artmasıyla taneler üzerine etkiyen santrifüj kuvveti azalmaktadır. Bu sebeple ince boyutlu tanelerin ayırma etkinliği azalmaktadır. İri boyutlu taneler için siklon çapının performansa önemli bir etkisi yoktur [42]. Bu durum breakaway boyutu ile de yakından alakalıdır. Siklon çapı büyüdükçe, breakaway boyutu da artmaktadır [26]. Siklon girişinde tıkanmaların önüne geçmek için siklon çapının, beslenen malzemedeki d_{95} boyutundan en az 20 kat fazla olması tavsiye edilmektedir [39]. Wang ve diğ. (2010), CFD kullanarak yaptıkları çalışmada apex çapının artmasıyla, siklondaki etkin çalışma basıncının ve üst akıma ortam bölünmesinin azaldığını göstermişlerdir [43]. Sabit besleme miktarında vortex çapı arttıkça etkin çalışma basıncı, alt akım-üst akım yoğunluğuk farkı ve üst akıma ortam bölünmesi azalmaktadır. Aynı zamanda E_p değeri ince boyutlu taneler için büyük oranda, iri taneler içinse daha düşük oranlarda artış göstermektedir [43]. Apex ve vortex çaplarının performansa etkisi birbiriyle de ilişkilidir. Apex çapının vortex çapına oranına koniklik oranı denir. He (1994), yaptığı doktora çalışmasında apex ve vortex çapını birlikte değerlendirmiş ortam bölünmesiyle koniklik oranının kuvvetli bir korelasyona sahip olduğunu ve koniklik oranı arttıkça üst akıma ortam bölünmesinin ve yoğunluk kaymasının arttığı ortaya koymuştur. Herhangi bir koniklik açısında ise ise vortex çapı azaldıkça ortam bölünmesi (medium split) ve E_p değeri de azalmıştır. Bu değişimler manyetit boyutu ile de ilişkilidir [30]. Apex/vortex çapı oranı

yükseldikçe alt akım-üst akım yoğunluk farkı da azalmaktadır. Spigot çapı, vortex çapının %85'ini geçmemelidir [44].

Ortam bölünmesi

Ortam bölünmesi, hacimsel olarak ortamın üst akıma veya alt akıma gitme oranıdır. Ağır ortam siklonları çalışma değişkenleri arasında en temeli olarak tanımlanır. Ortam bölünmesi, siklon performansı ile direkt ilişkilidir. Siklon geometrisi ve besleme basıncı performansa ortam bölünmesini değiştirerek dolaylı yoldan etki eder. Alt akım yoğunluğu ve alt akım-üst akım yoğunluk farkı, üst akıma yönelen ortam miktarı arttıkça artmaktadır. Üst akım yoğunluğu ise neredeyse etkilenmemektedir. Üst akım/alt akım ortam bölünmesi oranı 1'den düşük olduğunda alt akıma hafif taneler kaçmakta ve performans düşmektedir. Ortam bölünmesi oranı arttıkça performans da yükselmekte ve yaklaşık 4'ün üzerinde sabitlenmektedir. Herhangi bir ortam bölünmesi oranında daha küçük çaplı apex ve vortex kullanılarak, kapasiteden taviz verme pahasına, performans artırılabilir [45]. Etkin bir ayırma için beslenen ortam hacminin en az 2/3'ünün üst akıma gitmesi gerekmektedir. Beslenen ortamın ne kadarının üst akıma gittiği formül 3.1'e göre hesaplanabilir [25].

$$\varphi = \frac{SG_u - SG_f}{SG_u - SG_o} \quad (2.3)$$

Denklemden φ değeri üst akıma ortam bölünmesi oranıdır. SG_f , SG_u , ve SG_o değerleri sırasıyla besleme, alt akım ve üst akımın ortam yoğunluklarıdır. Boyuta bağlı dağılım eğrileri tek bir grafik üzerinde gösterildiğinde, eğriler pivot noktası denilen bir yoğunlukta kesişecektir. Pivot noktasına karşılık gelen dağılım aynı zamanda ortam bölünmesini vermektedir. Bu ilişki ortamın stabil olduğu durumlarda geçerlidir ve ortam bölünmesi bu şekilde de tespit edilebilir [46].

2.4 Performans Değerlendirme Kriterleri

Performansı ifade etmek amacıyla miktar, verim veya tenörü dikkate alan birçok yöntem ve formül geliştirilmiştir. Ancak pratikte bunların birkaçı kullanılmaktadır. [47]. Performans değerlendirmeleri bağımlı veya bağımsız kriter olmak üzere iki gruba ayrılır [48].

2.4.1 Bağımlı kriterler

Kömürün yıkanabilirliğine ve kullanılan ekipmanın karakteristiğine bağlı olan değerlendirmeler bağımlı kriterlerdir. Organik verim, Anderson verimi, kül ve verim hatası bu değerlendirmeye dahildir.

Organik verim

Zenginleştirme verimi, yıkama verimi veya kazanma verimi olarak da adlandırılır. Formül 3.2’de görüldüğü gibi gerçek verimle aynı kül oranında elde edilecek teorik verimin oranıdır.

$$\text{Organik verim} = \frac{\text{Gerçek verim}}{\text{Aynı kül oranındaki teorik verim}} \quad (2.4)$$

Anderson etkinliği

Doğru yerleşmiş malzemeyi gösterir ve formül 3.3’deki gibi hesaplanır.

$$\text{And. Etk.} = 100 - (\text{şistteki temiz kömür} + \text{lavedeki atık kömür}) \quad (2.5)$$

Kül hatası

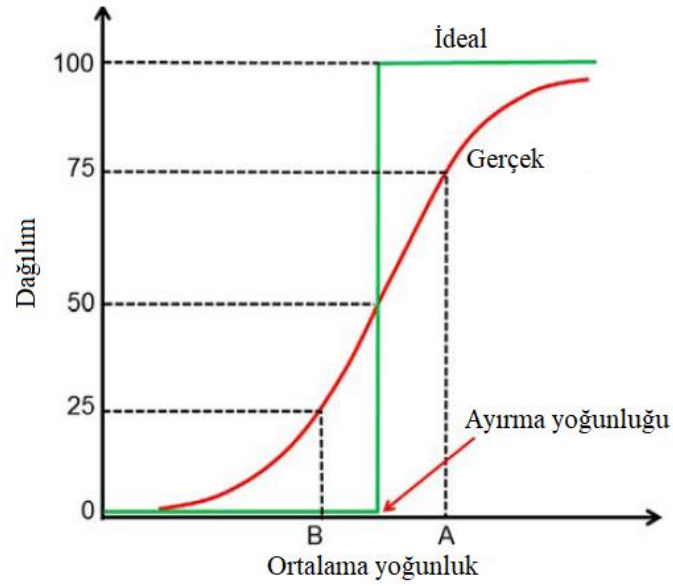
Kül hatası, kazanma verimiyle yakından ilişkilidir ve temiz kömürdeki kül oranı ile, aynı verimde elde edilecek teorik kül oranının farkıdır.

Verim hatası

Kül hatasına benzer şekilde hesaplanır. Gerçek temiz kömürün verimi ile aynı kül oranına tekabül eden verim arasındaki farktır.

2.4.2 Bağımsız kriterler

Bu kriterlerde kömürün yıkanabilirliğinden bağımsız olarak, yalnızca ekipmanın çalışma karakteristiğine bağlı performans değerlendirmesi yapılır. Hata faktörü (E_p), hata alanı ve hassasiyet faktörü bu gruptadır ve belirli bir kömürde farklı ekipmanların performansını değerlendirmede kullanılır. Şekil 2.12’de dağılım (Tromp) eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Dağılım eğrisi (tromp eğrisi).

Eğri; yoğunluğa karşılık gelen, beslemenin laveye veya şiste gitme oranına göre çizilir. İdeal eğri mükemmel ayrımı ifade eder ve ayırma yoğunluğunun üzerindeki yoğunluklardaki malzemenin tamamının şiste, ayırma yoğunluğunun altındaki malzemenin tamamının ise laveye yönlendirilmiş olduğu anlamına gelmektedir. Yani hatalı ayrılan malzeme yoktur. Ancak, gerçek uygulamalarda buna erişmek mümkün değildir. Özellikle yakın yoğunluktaki malzemelerde ve ince boyutlu malzemelerde hatalı ayrılma söz konusu olmaktadır. İdeal ve gerçek eğri arasında kalan alan, bu hatalı ayrılmış malzemenin miktarını ifade etmektedir.

Hata faktörü (E_p) değeri malzemenin %75 (A) ve %25'inin (B) atığa geldiği yoğunlukların farkının yarısıdır. Malzemenin %50'sinin atığa %50'sinin ise laveye gitti yoğunluk ise ayırma yoğunluğudur. E_p değeri ne kadar düşükse ayırım o kadar iyidir denilebilir. Hassasiyet faktörü ise hata faktörünün ayırma yoğunluğuna bölünmesi ile bulunur [49].

3. SAHA ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Daha önce belirtildiği üzere; günümüze değin, her ne kadar farklı zenginleştirme yöntemleri uygulanmış ve önerilmiş olsa da, son yıllarda kömür hazırlama tesisleri artık standart hale gelmiştir. Bu tesislerde ayırma işlemi genellikle ağır ortam sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İri boyutlarda Wemco tamburu, Drewboy ayırıcı gibi statik ağır ortam tamburları, orta boyut grubunda ise ağır ortam siklonları en çok tercih edilen ayırma ekipmanlarıdır. Son zamanlarda teknolojiye bağlı olarak özellikle su sıkıntısının yaşandığı bölgelerde ayırma ortamının hava veya hava+ağır ortam malzemesinin olduğu kuru zenginleştirme işlemleri de ön plana çıkmıştır. Su probleminin yaşanmadığı yerlerde ise ağır ortam en çok kullanılan ayırma yöntemi olup, son yıllarda üç ürünlü ağır ortam siklonları (ÜÜAOS) ön plana çıkmıştır.

Performansı belirlemek amacıyla ilk olarak tesiste ÜÜAOS'nun besleme ve çıkışlarından temsili numuneler alınmıştır. Aynı zamanda bu noktalardaki ortam yoğunlukları da kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmalar, alınan numuneler üzerinde yapılan yüzdürme-batırma testleri ve gerekli analizleri kapsamaktadır. ÜÜAOS'nın bulunduğu tesisin genel görüntüsü şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Akkurt kömür hazırlama tesisi.

Akkurt kömür hazırlama tesisi hakkında genel bilgiler

Akkurt Kömür Hazırlama Tesisi Zonguldak-Gelik Bölgesinde Karbomet Madencilik tarafından kurulmuş olan 70 t/h kapasiteli bir kömür hazırlama tesisidir. Tesis günde tek vardiya çalışmaktadır. Düşük kapasitesi sebebiyle oldukça basit yapıda olan Akkurt kömür hazırlama tesisi; tüvenan kömürün beslendiği 6 mm açıklıklı tüvenan elek, elek üstünün yönlendirildiği üç ürlü ağır ortam siklonu (ÜÜAOS), 2 adet süzme yıkama eleği (lave için 1 adet ve mikst ve şist için ortak elek), tikiner ve filter pres ünitelerinden oluşmaktadır. ÜÜAOS sisteminin uygulanması ile düşük kapasiteli olan bu kömür hazırlama tesisi daha da basit bir yapıda görünmektedir.

Ocaktan üretilmiş olan ve maksimum boyutu yaklaşık 70 mm olan tüvenan kömür, tüvenan besleme bandıyla 6 mm açıklıklı kuru eleme yapan tüvenan eleğine beslenmekte, elek altı mazleme (-6 mm) termik santrale gönderilmektedir. +6 mm boyutlu kömür numunesi ise 70 t/h yıkama kapasiteli ÜÜAOS'a beslenmektedir. ÜÜAOS'na ağır ortam mazlemesi ve kömür beslemesi farklı yerlerden yapılmaktadır. Tüvenan kömür numunesi gravite besleme ile ÜÜAOS'a beslenirken ağır ortamın büyük kısmı Larcodems ünitesinin alt kısmından, az bir kısmı ise ıslatma malzemesi olarak kömür beslemesinin yapıldığı yerden beslenmektedir. ÜÜAOS'da gerçekleştirilen ayırma sonrası Larcodems ünitesinden alınan lave numunesi süzme yıkama eleklerinden geçtikten sonra temiz kömür stok alanına alınmaktadır. ÜÜAOS ikinci ünitesi olan AOS'dan alınan mikst ve şist ürünleri ise; ikiye ayrılmış ve mikstin geldiği bölümün nispeten daha küçük tutulduğu tek parça-iki bölümlü süzme yıkama eleğinden geçmekte ve sonrasında ise ayrı ayrı alanlara yönlendirilmektedir. Yıkama eleğinden gelen kirli ortam ise tekrar devreye geri dönmeden önce manyetik separatörden geçerek temizlenmektedir. Şekil 3.2'de ÜÜAOS ve tesisin farklı noktalarından görüntüler mevcuttur.

3.1 Malzeme

Deneyisel çalışmalara esas olan malzeme; Zonguldak Bölgesinde kurulu olan Akkurt Madencilğe ait kömür hazırlama tesisine beslenen kömür ve ÜÜAOS ürünleridir. Bu noktalardan dört gün boyunca, birer saat aralıklarla numuneler alınmıştır. ÜÜAOS'a beslenen kömür numunesi üzerinde fraksiyonel kömür analizleri yapılmıştır. Bu analizlere ait sonuçlar çizelge 3.1'de verilmektedir.



TÜVENAN ELEK (6 mm) ve ŞLAME ELEĞİ



ÜÇ ÜRÜNLÜ AOS GRAVİTE BESLEME



ÜÇ ÜRÜNLÜ AOS



SÜZME YIKAMA ELEĞİ (MİKST ve ŞİŞT)



SÜZME YIKAMA ELEĞİ (LAVE)



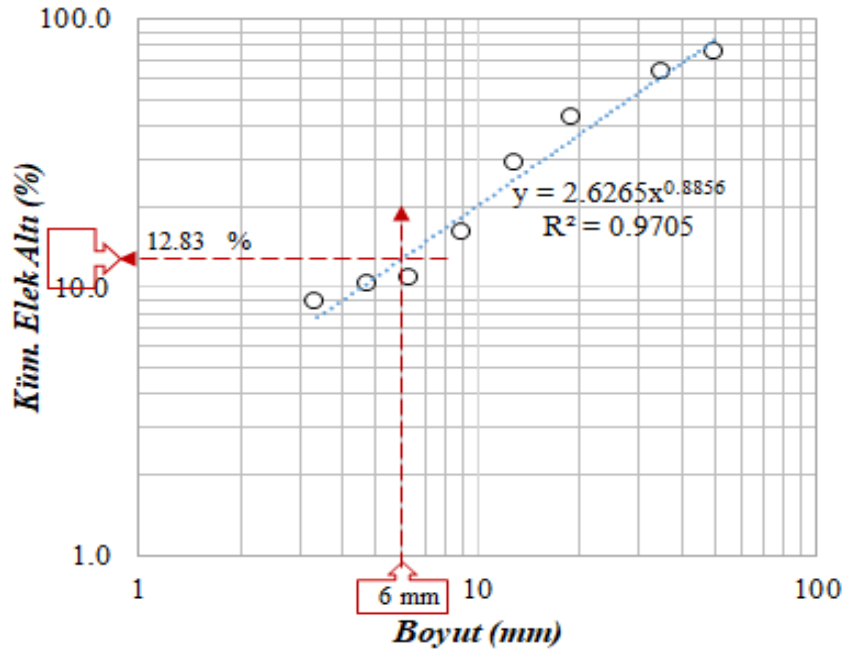
ÜRÜN SİLOLARI

Şekil 3.2 : Tesis ve ÜÜAOS'dan bazı görüntüler

Çizelge 3.1 : Tüvenan kömür fraksiyonel analiz sonuçları (kuru baz).

Boyut mm	Miktar g	Miktar %	Kül %	Karbon %	Kükürt %	Üst Isıl Değer kcal / kg
+50	4495	25.3	72.58	22.71	0.18	1158
-50+35	1957	11.0	64.32	31.08	0.18	1980
-35+19	3682	20.7	69.91	34.30	0.25	2486
-19+13	2451	13.8	50.15	46.88	0.28	3679
-13+9	2328	13.1	49.49	47.28	0.35	3775
-9+6,3	921	5.2	47.46	49.35	0.37	3939
-6.3+4.76	104	0.6	35.68	61.63	0.52	5138
-4.76+3.36	255	1.4	49.02	47.11	0.43	3734
-3.36	1559	8.8	62.71	31.98	0.36	2169
Toplam	17752	100.0	62.27	35.37	0.26	2509

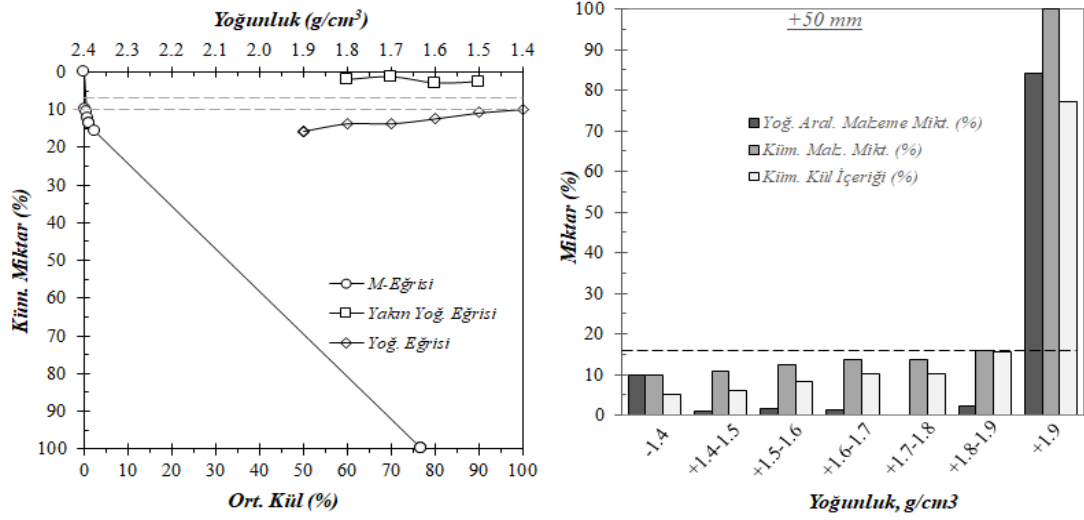
Çizelge 3.1’de verilen elek analiz sonuçlarından yararlanılarak oluşturulan boyut dağılım eğrisinden (şekil 3.3) görüleceği üzere; her ne kadar, tüvenan kömür numunesi ÜÜAOS öncesi 6 mm’lik titreşimli elekten elense de bir miktar -6 mm boyutlu kömürün (yaklaşık % 13) elek üstü malzemede kaldığını görünmektedir. Ancak, ÜÜAOS besleme boyutu sıfır boyuta kadar olabildiğinden bu durumun ÜÜAOS ayırma performansını etkilemeyeceği, sadece termik santrale verilen -6 mm boyutlu kömür miktarında bir miktar azalmaya sebebiyet verebileceği düşünülmüştür.



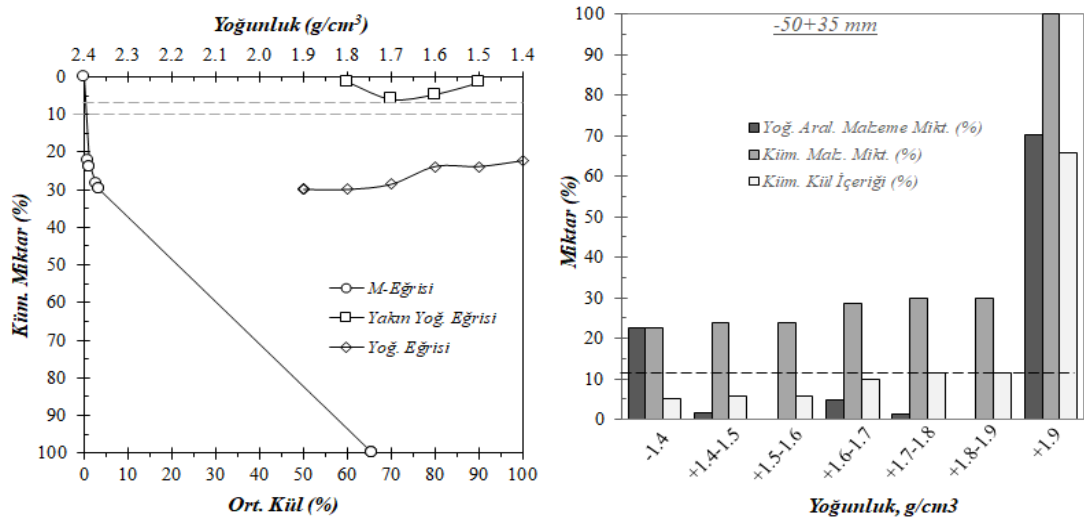
Şekil 3.3 : Tüvenan Kömür Boyut Dağılımı

Tüvenan kömürün yıkanabilirliği

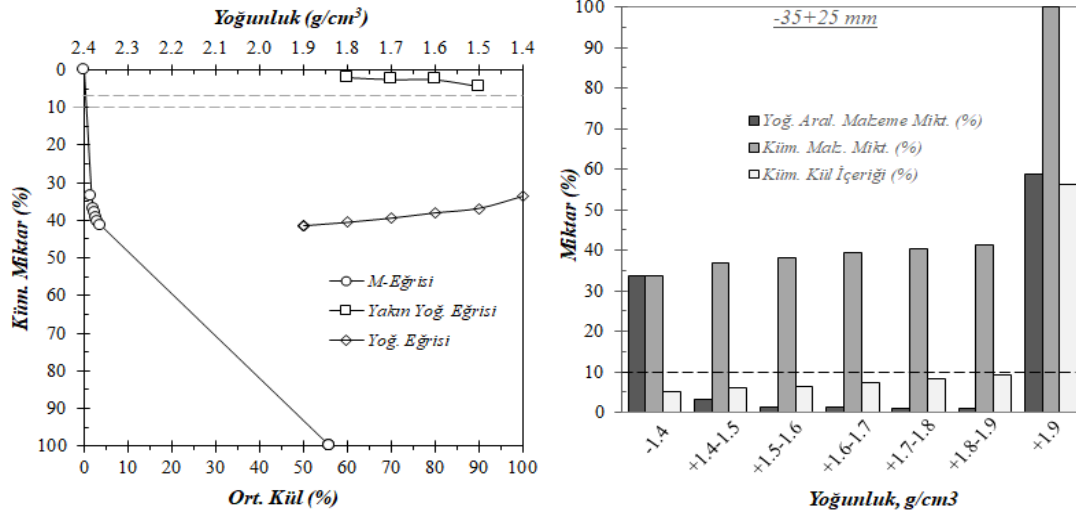
Deneysel çalışmalarda kullanılan, ÜÜAOS'a beslenen kömür numunesinden alınan temsili numune üzerinde yüzdürme batırma testi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar derlenerek M-Eğrisi olarak şekil 3.4 – 3.13'de verilmiştir. M eğrileri, klasik yüzdürme-batırma eğrilerine göre daha basit yapıda olup, değerlendirilmesi daha anlaşılırdır. M-eğrisinin değerlendirilebilirliği ve her bir boyut aralığındaki malzemenin yakın yoğunluk aralığındaki mazleme miktarı eğrisi o boyut fraksiyonunun yıkanabilirliği hakkında bilgi vermektedir.



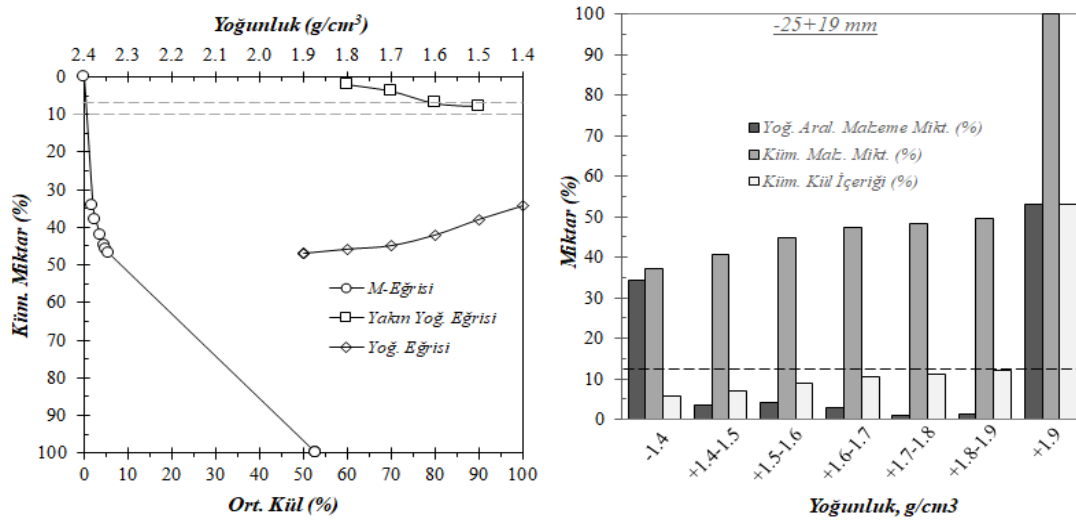
Şekil 3.4 : +50 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



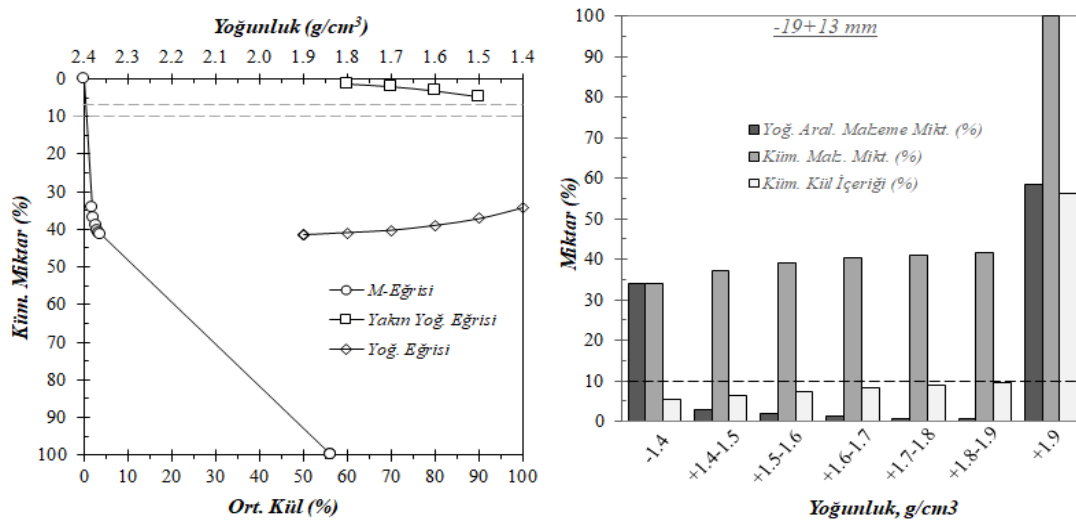
Şekil 3.5 : -50+35 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



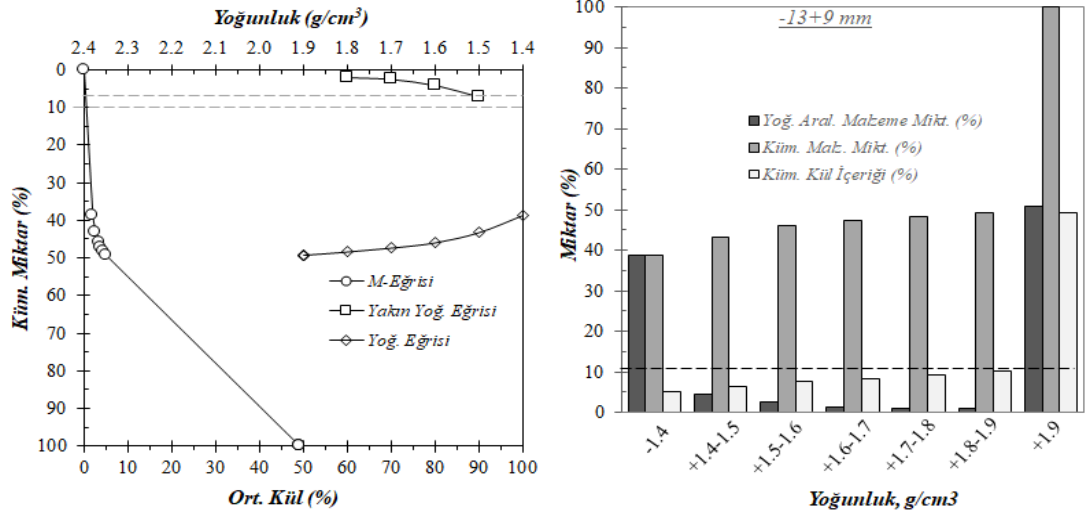
Şekil 3.6 : -35+25 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



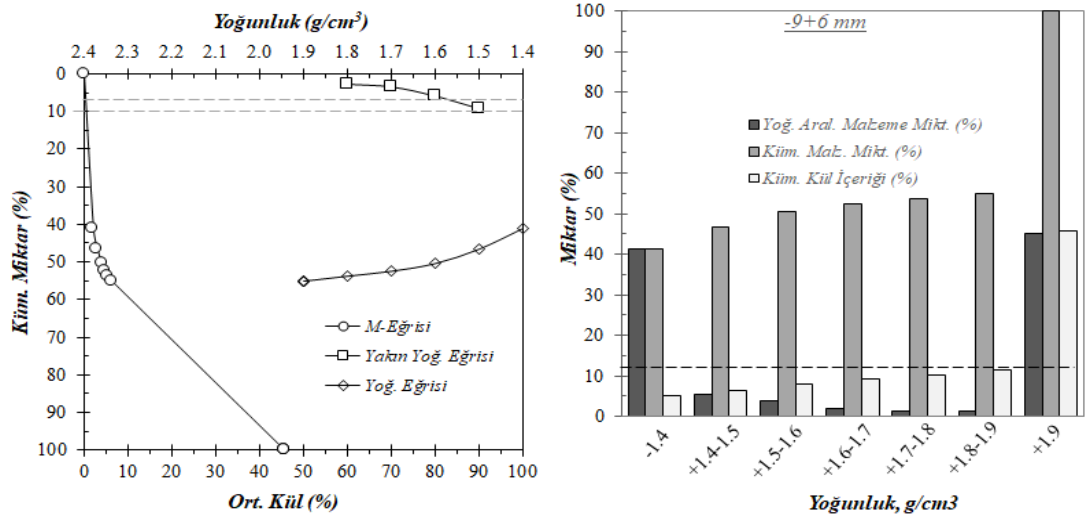
Şekil 3.7 : -25+19 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



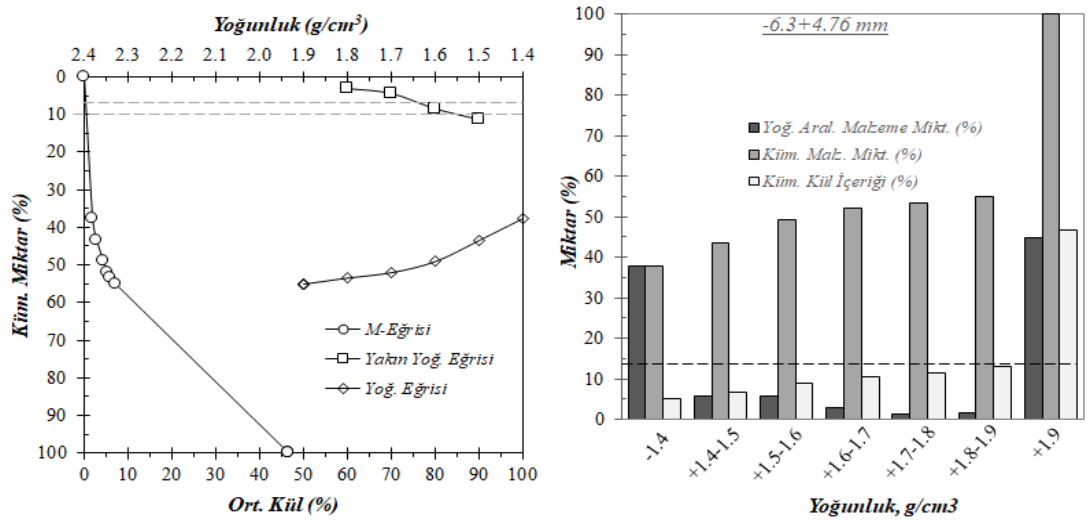
Şekil 3.8 : -19+13 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



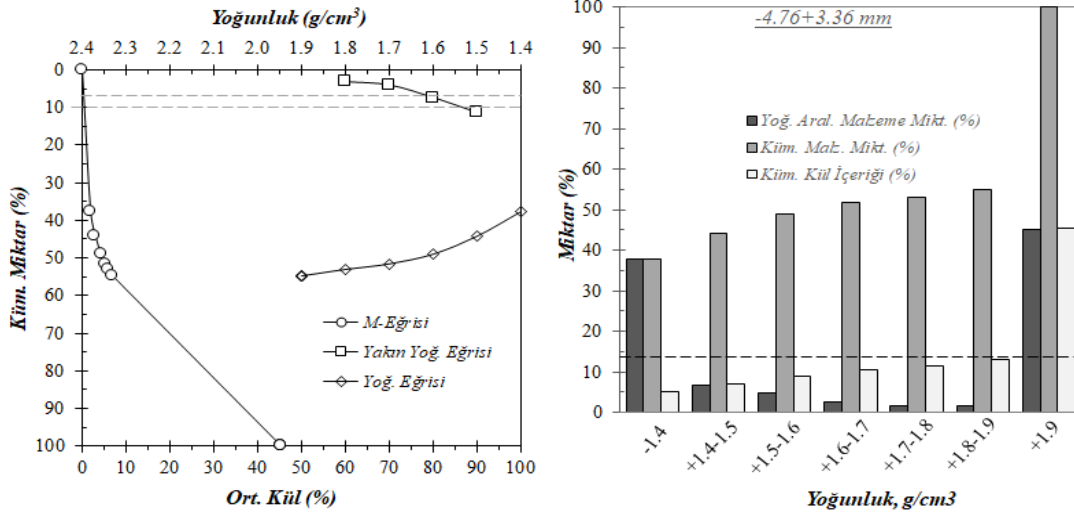
Şekil 3.9 : -13+9 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



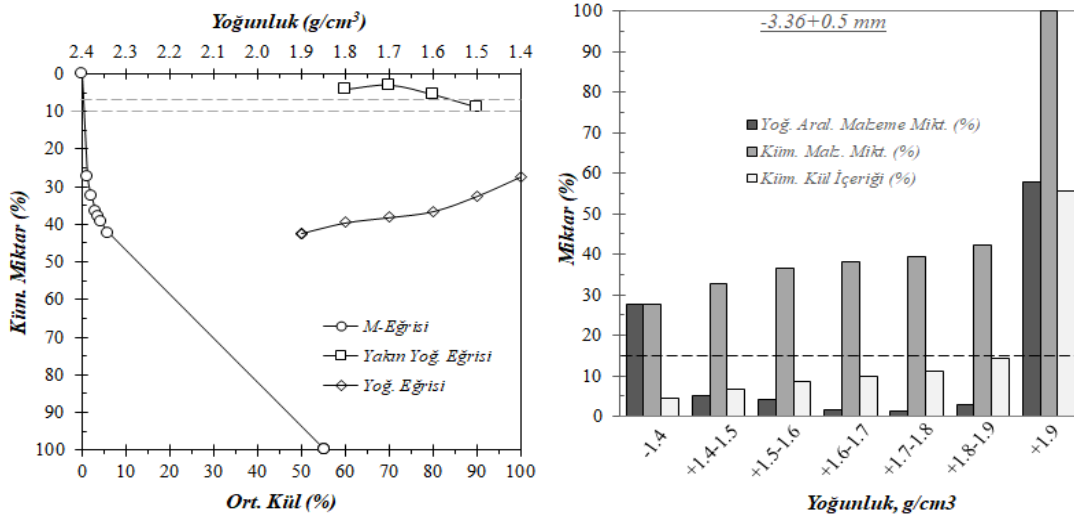
Şekil 3.10 : -9+6 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



Şekil 3.11 : -6.3+4.76 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.



Şekil 3.12 : -4.76+3.36 mm boyut rubunun yıkanabilirliği.



Şekil 3.13 : -3.36+0.5 mm boyut grubunun yıkanabilirliği.

Tüvenan kömür üzerinde yapılan yüzdürme-Batırma testleri sonucunda, fraksiyonel olarak genelde 1.5-1.8 g/cm^3 , yıkama yoğunluklarında yapılacak ayırmalarda, tüvenan kömrün kolay-çok kolay yıkanabildiği tespit edilmiştir. Hemen hemen tüm boyut grupları için, 1.5-1.8 g/cm^3 yoğunlukları arasındaki mazleme miktarı oldukça düşük olup, bazı boyut grupları için bu yoğunluklar arasındaki mazlemenin hiç olmadığı da yapılan çalışmalar sonrasında belirlenmiştir.

Yakın yoğunluk aralığındaki mazleme miktarının düşük olması kömürlerin kolay yıkanabilirliğini göstermektedir. Öyleki, yakın yoğunluk aralığındaki mazleme miktarının çoğu zaman % 7'den daha az olması bu yakın yoğunluklardaki mazleme kaçaklarının %50 - %50 olması durumunda dahi hatalı ayrılmış malzeme miktarının belirli sınırlar altında küçük değerlerde kalacağını ifade etmektedir.

Kömür örneğinin yıkanabilirliğinin kolay-çok kolay olması ayrıca; ağır ortam sistemine beslenen hacimsel ortam/kömür oranının düşük seviyelerde (3:1) tutulabileceğini göstermektedir. Yıkanabilirliği zor olan kömürlerde bu oran 5:1 seviyelerine kadar çıkabilmekte bu da AOS kapasitesini ve dizayn parametrelerini doğrudan etkilemektedir.

Yüzdürme-batırma eğrilerinde dikkat çeken bir başka husus; hemen hemen her boyut grubu için, çok yüksek yıkama yoğunluklarında dahi (örneğin 1.90 g/cm^3) %15 ve daha düşük kül içerikli temiz kömür üretilebileceğidir.

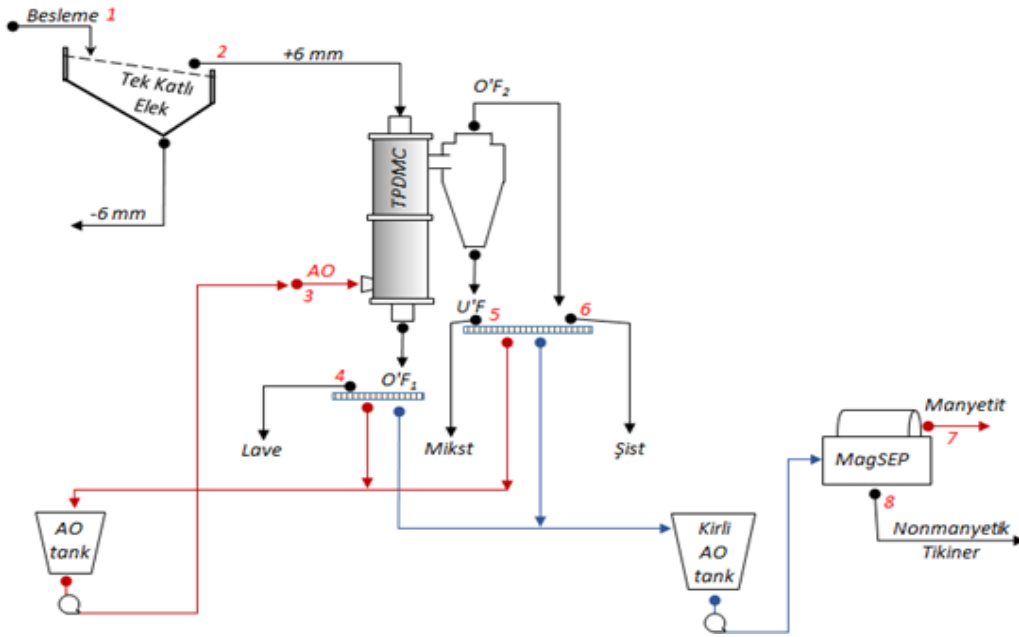
3.2 Yöntem

Performansı belirlemek amacıyla öncelikle yapılması gereken malzeme balansının kurulmasıdır. Bu amaçla ÜÜAOS'a giren ve çıkan ürünlerden numuneler alınmıştır. Numuneler, üst çapı 30 cm alt çapı 10 cm olan ve 40 cm derinliğinde yarım konik kaplarla toplanmıştır. Çıkış ürünleri süzme-yıkama eleklerinin sonundan, besleme ise üç ürünlü ağır ortam siklonu beslemesinden önce kullanılan yıkama eleğinden alınmıştır. Şekil 3.14'de genel akım şeması verilen tesisten 2, 4, 5 ve 6 numaralı noktalardan alınan numuneler analiz edilmek üzere, İTÜ Cevher Hazırlama Müh. Bölüm laboratuvarlarına nakledilmiştir.

Numune alım sırasında, ÜÜAOS alt akım ve üst akım çıkışlarındaki ortamdan, ağır ortam beslemesinden de numuneler alınmış ve ortam yoğunlukları tespit edilerek ayırmanın hangi şartlarda gerçekleştiği yorumlanmıştır. Ayrıca ÜÜAOS geometrisi ile ilgili veriler de toplanmıştır.

Temsili olarak alınan gerek tüvenan, gerekse ÜÜAOS ürünleri yüzdürme-batırma işlemine tabii tutulmuş ve tüvenan kömürün yıkanabilirliği (kolay-zor) ve ayırma performansı tesbit edilmiştir. Yüzdürme batırma testleri; çinko klorür (ZnCl) tuzu kullanılarak, yoğunlukları 0.1 g/cm^3 aralıklarla artacak şekilde ayarlanmış, $1.4\text{-}1.9 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen ağır sıvılarda gerçekleştirilmiştir.

Yüzdürme batırma testleri dar boyut gruplarında gerçekleştirilmiş ve bu şekilde kömür boyutuna bağlı olarak E_p , RD_{50} değişimleri saptanmıştır. Farklı boyut gruplarında gerçekleştirilen detaylı yüzdürme batırma sonuçları hem performansın yorumlanması hem de daha sonra ayırmanın simulasyonundaki verilerin oluşturulması açısından kolaylık sağlamıştır.



Şekil 3.14 : Akkurt kömür hazırlama tesisi genel akım şeması.

ÜÜAOS ayırma performansının belirlenmesinde en önemli unsur malzeme balansının doğruluğudur. İki ürünlü sistemlerde kül analizleri ile malzeme balansı kolaylıkla yapılabilmektedir. Ancak, üç ürünlü sistemlerde sadece kül içerikleri ile malzeme balansının kurulmasında zorluklar yaşanmaktadır. Malzeme balansının kurulması probleminin giderilmesi için, eğer mümkün ve mevcut ise, yoğunluk izleyicilerin kullanımı önerilmektedir. Bir diğer öneri ise kül içeriklerinin yanısıra kükürt veya kalorifik değer içerikleri ile malzeme balansının kurulmasıdır. Bununla ilgili yardımcı eşitlik formül 3.1’de verilmiştir. Dolayısıyla malzeme balansının doğru kurulabilmesi için her boyut ve yoğunluk fraksiyonundaki ürünün kül ve kükürt değerleri ölçülmüştür.

$$Y_p = \frac{b_f(a_2 - a_3) + b_2(a_3 - a_f) + b_3(a_f - a_2)}{b_1(a_2 - a_3) + b_2(a_3 - a_1) + b_3(a_1 - a_2)} \quad (3.1)$$

Burada; a_f , a_1 , a_2 ve a_3 sırasıyla beslenen, temiz kömür, mikst ve şist küllerini, b_f , b_1 , b_2 ve b_3 simgeleri ise sırasıyla aynı akımların (ürünlerin) bir diğer analiz değerini göstermektedir. Bu diğer analiz değeri kalorifik değer ya da toplam kükürt içerikleri olabilmektedir ve bunlardan kükürt içeriklerinin kullanılması ile daha hassas ve etkili sonuçlara ulaşılabileceği ifade edilmiştir [5].

Her ne kadar kül içeriklerine ilave olarak toplam sülfür içerikleri kullanılarak malzeme dengesi kurulabileceği ifade edilmiş olsa da, Zonguldak bölgesi kömürlerinin genel

olarak düşük kükürt içerikleri ve ürünlerdeki dağılımlarının düzensiz olması ve analiz operatörü hatasının da toplam kükürt içeriklerine bağlı olarak hassas olması sebebiyle, toplam kükürt içerikleri kullanılarak doğru bir malzeme balansı sağlanamamıştır. Ancak, ÜÜAOS ürünleri yoğunluk dağılımları incelendiğinde, bazı yoğunlukların dağılımlarının üç ürün bazında olmadığı tespit edilmiştir. Örneğin -1.4 yoğunluğundaki mazleme sadece lavede ya da lave ve mikstte toplanmıştır veya +1.9 yoğunluğundaki mazleme sadece şistte ya da mikst ve şistte toplanmıştır. Bu durumda bu yoğunluk fraksiyonlarındaki ikili ya da tekli dağılımlar direkt veya kül dengesi ile hesaplanmıştır. Üç ürüne dağılım olduğu durumlarda ise matris çözümlemesi ile malzeme balansı kurulmuştur. Hesaplanan miktarların doğruluğu, hem yıkanabilirlik eğrileri kullanılarak hem de tüvenan için yeniden hesaplanan boyuta bağlı kül-kükürt verileri ile orijinal kül-kükürt verileri kıyaslanarak kontrol edilmiştir.

Malzeme balansı kurulumu çizelge 3.2'deki veriler üzerinden örneklenecek olursa;

- -1,4 yoğunluğunda yalnızca lavede ürün vardır. Bu sebeple kül veya kükürt oranlarına bakmaksızın bu boyut ve yoğunluk fraksiyonunda laveye dağılım %100 kabul edilmiştir.
- +1,4-1,5 yoğunluğu için lave ve mikstte ürün vardır. Laveye dağılım kül dengesi kullanılarak $100 \cdot (\text{tüvenan külü} - \text{mikst külü}) / (\text{lave külü} - \text{mikst külü})$ eşitliğinden hesaplanmıştır.
- +1,5-1,6 yoğunluğunda ise tüvenan üç ürüne de dağılım göstermiştir. Burada kül ve kükürt miktarları birlikte dikkate alınmıştır ve sistemin çözümü matrislerle aşağıdaki şekilde ifade edilerek, ters matris yöntemiyle dağılımlar (L, M ve Ş) hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} 24,55 & 29,23 & 29,92 \\ 0,68 & 0,55 & 1,21 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L \\ M \\ Ş \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \times 28,71 \\ 100 \times 0,83 \\ 100 \end{bmatrix}$$

Çizelge 3.2 : Malzeme balansı örnek verileri.

	Lave		Mikst		Şist		Tüvenan	
-13+9 mm	Kül, %	Kükürt, %	Kül, %	Kükürt, %	Kül, %	Kükürt, %	Kül, %	Kükürt, %
-1,4	5,14	0,61	-	-	-	-	5,89	0,58
+1,4-1,5	16,14	0,78	21,68	2,17	-	-	18,47	0,69
+1,5-1,6	24,55	0,68	29,23	0,55	29,92	1,21	28,71	0,83

3.3 Hesaplanan Dağılımların Kontrolü

Dağılım hesaplanmasında kullanılan yöntemin doğruluğunun, hesaplanan malzeme miktarlarının performans belirlemede kullanılabilirliğinin denetlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tüvenanın hesaben bulunan dağılımlara göre yeniden oluşturulmuş boyut fraksiyonlarındaki kül-kükürt değerleri, orjinalleriyle kıyaslanmış ve çizelge 3.3’de verilmiştir. Aynı zamanda hesaben bulunan yüzdürme-batırma değerlerine göre her boyut için Mayer eğrileri çizilmiş ve bu eğrilerde, gerçekte lave ve şist için elde edilen kül değerlerine karşılık gelen dağılımlar bulunmuştur. Bu dağılımların hesaben bulunan dağılımlar ile karşılaştırılması ise çizelge 3.4’te verilmiştir. Çizelge 3.3’e bakıldığında kül değerlerinin birbiriyle yüksek hassasiyette uyuştugu görülmektedir. Kükürt değerleri ise ölçümlerde aşırı hassasiyet gösterdiği halde nispeten uyumlu ve kabul edilebilir görünmektedir. Çizelge 4.4’te ise hesaplanan değerler ile teorik değerlerin birbirine son derece uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Burada %1.6’lık şistin mikste gittiği görünmektedir. Performans açısından bu sonucun açıklaması daha sonraki bölümlerde yapılacaktır. Ancak bu iki çizelgeye göre hesaplanan dağılımların performans tayini için kabul edilebilir olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.3 : Hesaplanan kül-kükürt ile gerçek değerlerin karşılaştırması.

Boyut Grubu, mm	Kül, %		Kükürt, %	
	H	Y-B	H	Y-B
+50	77,15	78,26	0,18	0,21
-50+35	66,02	68,94	0,25	0,27
-35+25	56,12	56,89	0,21	0,28
-25+19	50,82	53,60	0,34	0,31
-19+13	56,37	56,14	0,34	0,31
-13+9	49,30	48,36	0,41	0,37
-9+6,3	45,77	45,37	0,40	0,42
-6,3+4,76	46,54	46,83	0,46	0,34
-4,76+3,36	45,53	43,39	0,43	0,38
-3,36+0,5	55,51	55,79	0,36	0,30

H: Hesaplanan, Y-B: Yüzdürme-Batırma Sonucundan

Çizelge 3.4 : Hesaplanan dağılımlar ile Mayer eğrisine göre teorik dağılımların karşılaştırılması.

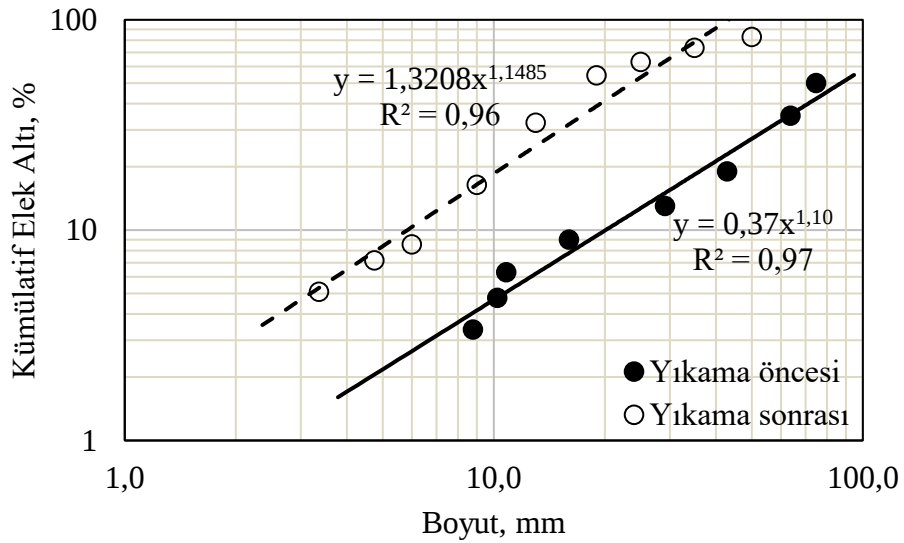
Boyut Grubu mm	Lave, %		Mikst, %		Şist, %	
	H	M-C	H	M-C	H	M-C
+50	11,2	11,4	5,6	3,9	83,2	84,7
-50+35	23,9	23,7	6,2	5,8	69,9	70,5
-35+25	37,1	36,4	3,4	3,5	59,5	60,1
-25+19	41,2	40,8	8,0	7,5	50,8	51,7
-19+13	37,7	37,1	3,6	3,2	58,7	59,7
-13+9	44,5	43,6	3,9	3,1	51,6	53,3
-9+6,3	48,1	47,3	7,8	4,4	44,1	48,3
-6,3+4,76	45,7	45,1	11,4	7,1	42,9	47,9
-4,76+3,36	45,7	45,2	11,0	5,8	43,3	48,9
-3,36+0,5	32,7	32,9	9,6	4,1	57,7	63,0
Total	31,4	31,4	5,6	4,0	63,0	64,6

H: Hesaplanan, M-C: Mayer eğrisinden

4. SONUÇLAR

4.1 Sistemde Malzemenin Ufalanması

Üç ürünlü ağır ortam siklonu gravite beslemeli olarak çalışmaktadır. Pompa kullanılmadığından dolayı sistem içerisinde ufalanmaların minimum düzeyde olması beklenmiştir. Ancak şekil 4.1’de verilen yıkama öncesi ve sonrası boyut dağılımına bakıldığında malzemede; önemli bir miktarda ufalanma olduğu görülmektedir. Eğrilerin fonksiyonlarında x değerlerinin katsayılarına bakarak, yaklaşık 3.5-4 kat ufalanma olduğu söylenebilir. Ancak bu ufalanmanın önemli bir kısmının ürünler ÜÜAOS’dan çıktıktan sonra gerçekleştiği düşünülmektedir. Yüksek basınçla çıkan ürünler şutlara çarpmakta ve ufalanma artmaktadır.



Şekil 4.1 : Yıkama öncesi ve sonrası beslenen kömürün boyut dağılımları.

4.2 Tromp Eğrileri

Malzeme balansı kurulumunu takiben, her boyut fraksiyonu için tromp (dağılım) eğrileri çizilmiştir ve şekil 4.2’de verilmiştir. Genellikle 1.85 g/cm^3 yoğunluğunda gözlemlenen sapmalar, formül 4.1’de verilen Whiten eşitliği kullanılarak düzenlenmiştir. Tromp eğrilerinden yola çıkarak ayırma yoğunlukları (RD_{50}) ve hata faktörleri (E_p) bulunmuştur ve boyuta bağlı değişimleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

$$Y_{üst} = 100 - (100 * \frac{1}{1 + e^{\frac{1.0986 * (RD_{50} - RD_i)}{E_p}}}) \quad (4.1)$$

Yukarıda verilen eşitlikte; RD_{50} ve RD_i simgeleri sırasıyla ayırma yoğunluğunu ve yoğunluk aralığını, E_p simgesi ise hata faktörünü ifade etmektedir.

Larcodems için boyuta bağlı E_p değerleri 0,021-0,058 aralığında değişirken, AOS için bu aralık 0,035 ile 0,100 aralığındadır. Bu ilişki şekil 4.3’de görülebilir. AOS’da E_p değerlerinin Larcodems’e göre yüksek çıkmasının sebebi, ayırma yoğunluğunun artmasıdır. Her iki ünite için de E_p değerleri belirli boyutun altında keskin olarak artış göstermiştir. Bu boyut daha önce bahsedilen breakaway boyutunu işaret etmektedir. İlişki üssel fonksiyonla ifade edildiğinde, fonksiyonun eğiminin her iki ünite için de yaklaşık aynı değerde olduğu bu da iki ünitedeki breakaway boyutunun yaklaşık aynı olacağını göstermektedir. Grafikler incelendiğinde her iki ünite için 6 mm civarında breakaway boyutu olduğu söylenebilir. Breakaway boyutu, formül 4.2’de verilen eşitlik kullanılarak, söz konusu ünitelerin çapları ile de ilişkilendirilebilmektedir [26].

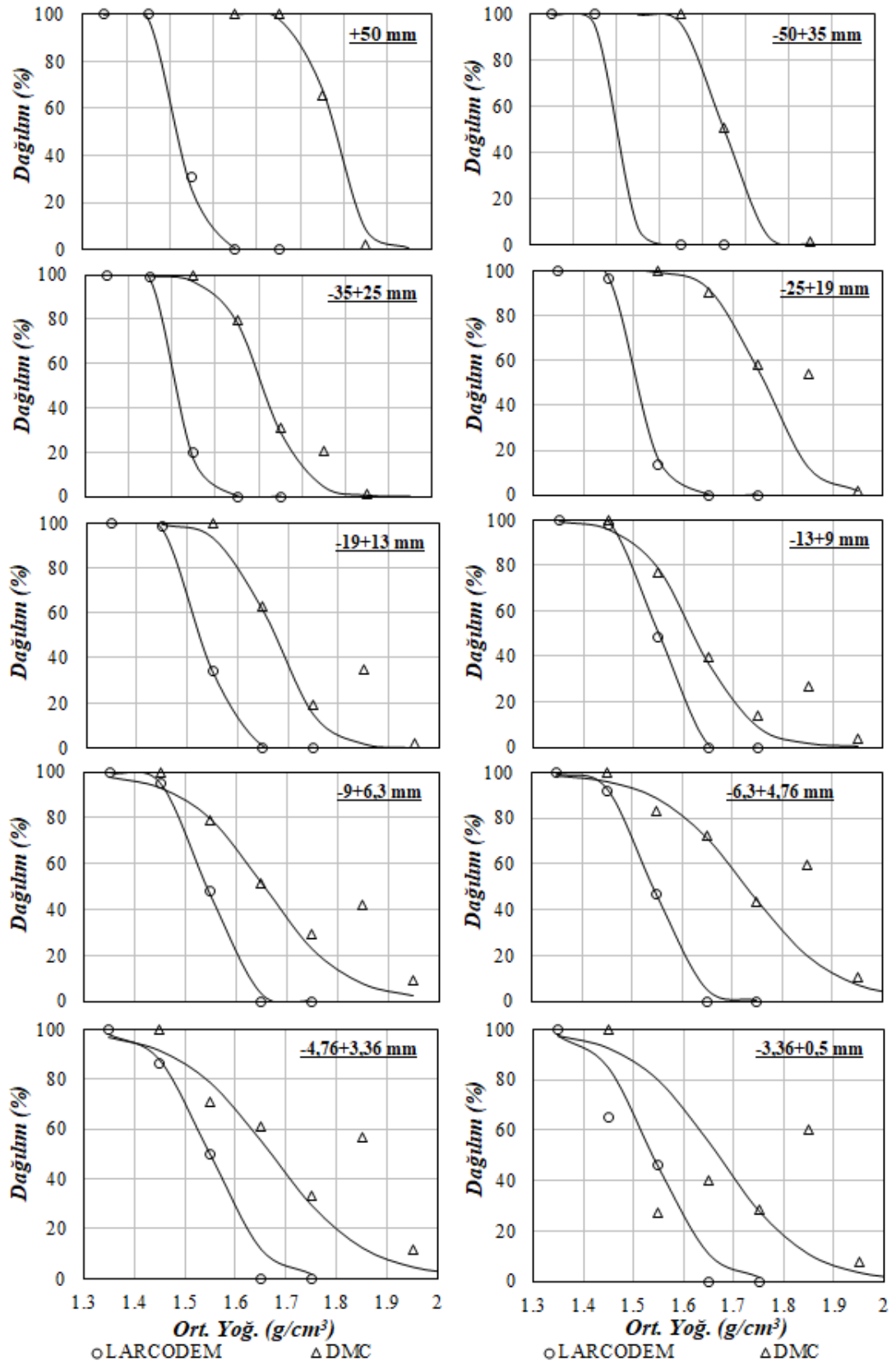
$$d_b = (6 * \emptyset^{1.64}) * 10^{-5} \quad (4.2)$$

Larcodem ve AOS ünitesinin çaplarının 950 ve 550 mm olduğundan her iki ünite için breakaway size boyutları;

$$d_{b(larcodems)} = (6 * 950^{1.64}) * 10^{-5} = 4.59 \text{ mm}$$

$$d_{b(AOS)} = (6 * 550^{1.64}) * 10^{-5} = 1.87 \text{ mm}$$

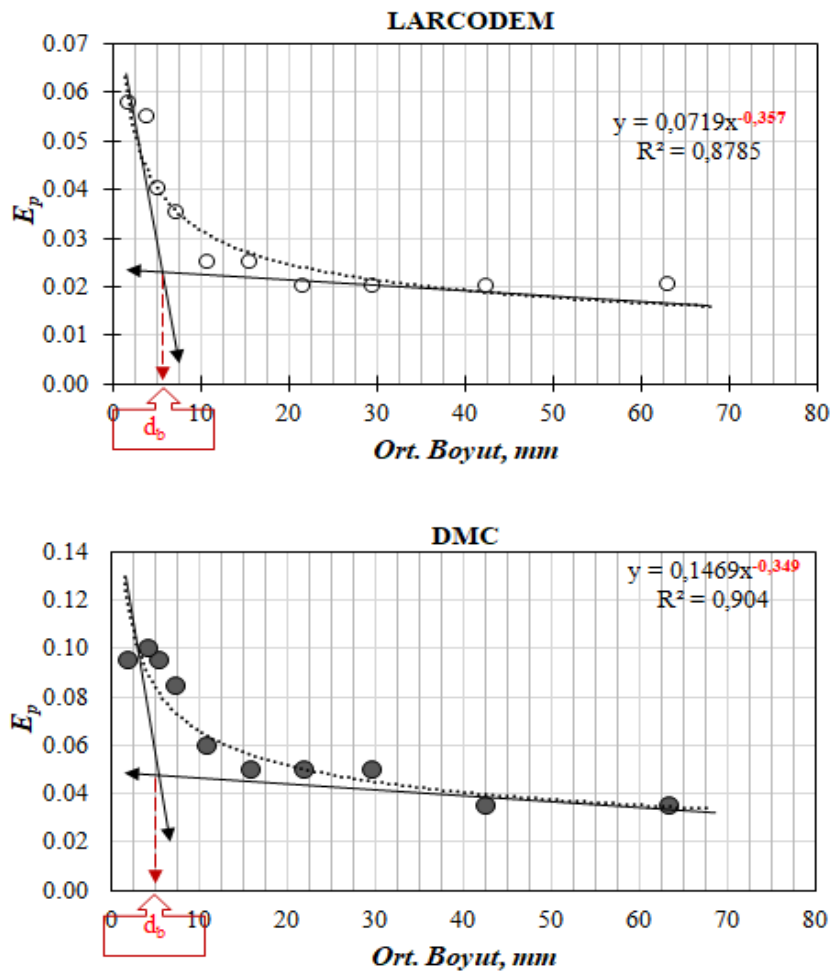
olarak hesaplanmıştır. Bu değerler teoriktir ve grafikten elde edilen gerçek değerlerden daha küçüktür. Larcodems ünitesi için nispeten yakın değerler çıkmıştır, dolayısıyla besleme basıncının bu ünite için uygun olduğu söylenebilir. Ancak AOS için breakaway boyutunun beklenenden yaklaşık 3 kat daha büyük çıkması, malzemenin Larcodems’ten AOS’a geçerken uygun basınç sağlamadığını veya AOS alt akım-üst akım çaplarının uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.2 : Boyuta göre dağılım eğrileri.

Çizelge 4.1 : Boyuta bağlı RD₅₀ ve E_p değerleri.

Ortalama Boyut mm	RD ₅₀ LARCODEMS	E _p LARCODEMS	RD ₅₀ AOS	E _p AOS
63.2	1.530	0.021	1.875	0.035
42.5	1.505	0.020	1.750	0.035
29.6	1.520	0.020	1.710	0.050
21.8	1.520	0.020	1.760	0.050
15.7	1.535	0.025	1.670	0.050
10.8	1.550	0.025	1.620	0.060
7.3	1.545	0.035	1.655	0.085
5.3	1.545	0.040	1.730	0.095
4.060	1.550	0.055	1.670	0.100
1.930	1.540	0.058	1.670	0.095



Şekil 4.3 : Boyuta bağlı E_p değerleri.

Ayırma yoğunluklarının boyuta göre değişimleri şekil 4.4’de verilmiştir. ÜÜAOS’nın ilk ayırma ünitesi olan Larcode ms ayırıcısında genel olarak kömür boyutunun küçülmesine bağlı olarak ayırma yoğunluklarında artış gözlenmiştir. Bu durum tanelerin küçük olmasından dolayı, siklon besleme basıncının doğal olarak yetersiz

kalması ve bu tanelerin ayırma ortamı içerisinde geçişi sırasında doğru yerleşim alamamasından kaynaklanmaktadır. Ancak ikinci ayırma ünitesi olan AOS'da bu durumun tam tersi bir davranışla karşılaşılması beklenmeyen bir durumdur. AOS'da tane boyutu küçüldükçe ayırma yoğunluğu da düşmüştür. Bu durum aşağıdaki nedenlerden kaynaklanabilmektedir;

- ÜÜAOS ürünleri üzerinde doğru bir malzeme balansı yapılamaması.
- Araürün (mikst) miktarının düşük seviyelerde olması (<%10) yapılacak küçük işlem ya da ayırma hatalarının büyük oranlarda yansması.
- Mikst ürününün killi olması ve killi topaklar içerisinde küçük boyutlu kömürlerin bulunması. Bu durum yıkama işlemi sırasında ikinci ünite (AOS) kilin dağılması ve alınan ürünlerin yüzdürme batırma testleri öncesinde yıkanması sonucu killi kısmın uzaklaşarak geride serbest halde düşük özgül ağırlıklı kömür numunesi bırakması ile sonuçlanmıştır.
- AOS ve Larcodems-AOS geçiş bölgesi geometrisinin uygun olmayışı.

nedenlerinden kaynaklanabilmektedir. Bu nedenler araştırıldığında;

ÜÜAOS üzerinde kurulan malzeme balansı, ulaşılan hedef kül değerleri için elde edilebilecek ürün miktarları balansı ile karşılaştırılarak kontrol edilmiş ve doğruluğu onaylanmıştır.

Araürün miktarının düşük olması ve küçük ayırım hatalarının sonuca büyük oranda yansması düşüncesi ise; dağılım hesapları; malzeme balansı araürün yokmuş gibi değerlendirildiğinde ya da $\pm 5\%$ değişim gösterebilir düşüncesine göre yeniden değerlendirildiğinde dahi, küçük boyutlardaki ayırma yoğunluğundaki düşüş trendini değiştirmemektedir.

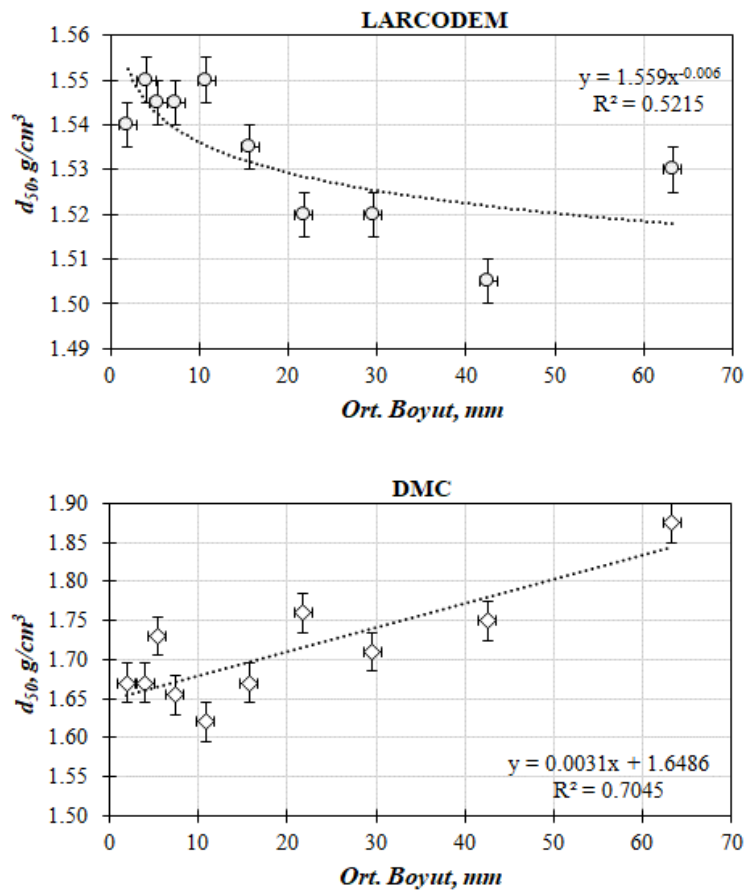
Araürün (mikst) daha çok killi yapıdadır. Bu durum yıkama işlemi sırasında ikinci ünite (AOS) kilin dağılması veya alınan ürünlerin yüzdürme batırma testleri öncesinde yıkanması sonucu killi kısmın uzaklaşarak geride serbest halde düşük özgül ağırlıklı kömür numunesi bırakması ile sonuçlanabilmektedir. Öyleki, yıkama sırasında yoğunluğu örneğin 1.65 g/cm^3 olan mikst ürünü yüzdürme batırma testi öncesi incisini ayırmak için yıkandığında killi kısmını kaybetmekte geride yoğunluğu $1.4-1.5 \text{ g/cm}^3$ olan temiz kömür ürünleri bırakmaktadır. Bu durum bu mikst taneleri için ayırma yoğunluğunun gerçekten daha az olarak belirlenmesine sebebiyet

vermektedir. Deneysel çalışmalar sırasında bu durum farkedilmiş, ancak, yüzdürme batırma testinin standartı gereği müdahale edilmemiştir.

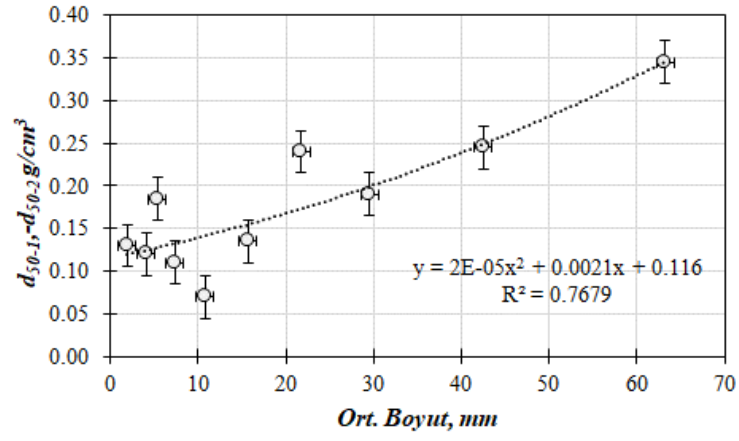
Bir diğer muhtemel neden ise ÜÜAOS'na beslenen ortamın yönlendirilmesi yani AOS ve AOS-Larcodem bağlantısı geometrisi ile ilgili olabilmektedir. Bu ihtimal siklon geometrisinin performans etkisi kısmında detaylı olarak incelenecektir.

ÜÜAOS birinci ve ikinci ayırma ünitesi arasındaki ayırma yoğunluklarının boyuta bağlı olarak değişimi ise şekil 4.5'de verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere; ilk ve ikinci ayırma ünitelerinde gözlemlenen ayırma yoğunlukları arasındaki farkın boyuta göre değiştiği ve 0.1-0.4 arasında olduğu aynı zamanda boyut artışına bağlı olarak 0.4 değerine yaklaştığı görülmektedir. Bu davranış beklenen bir durumda ortaya çıkmıştır. Öyleki, küçük tanelerin ayırma ortamı içerisindeki yerleşimi zaman alırken, büyük taneler daha kısa sürelerde olması/yönlendirilmesi gereken bölgelere ulaşabilmektedir.

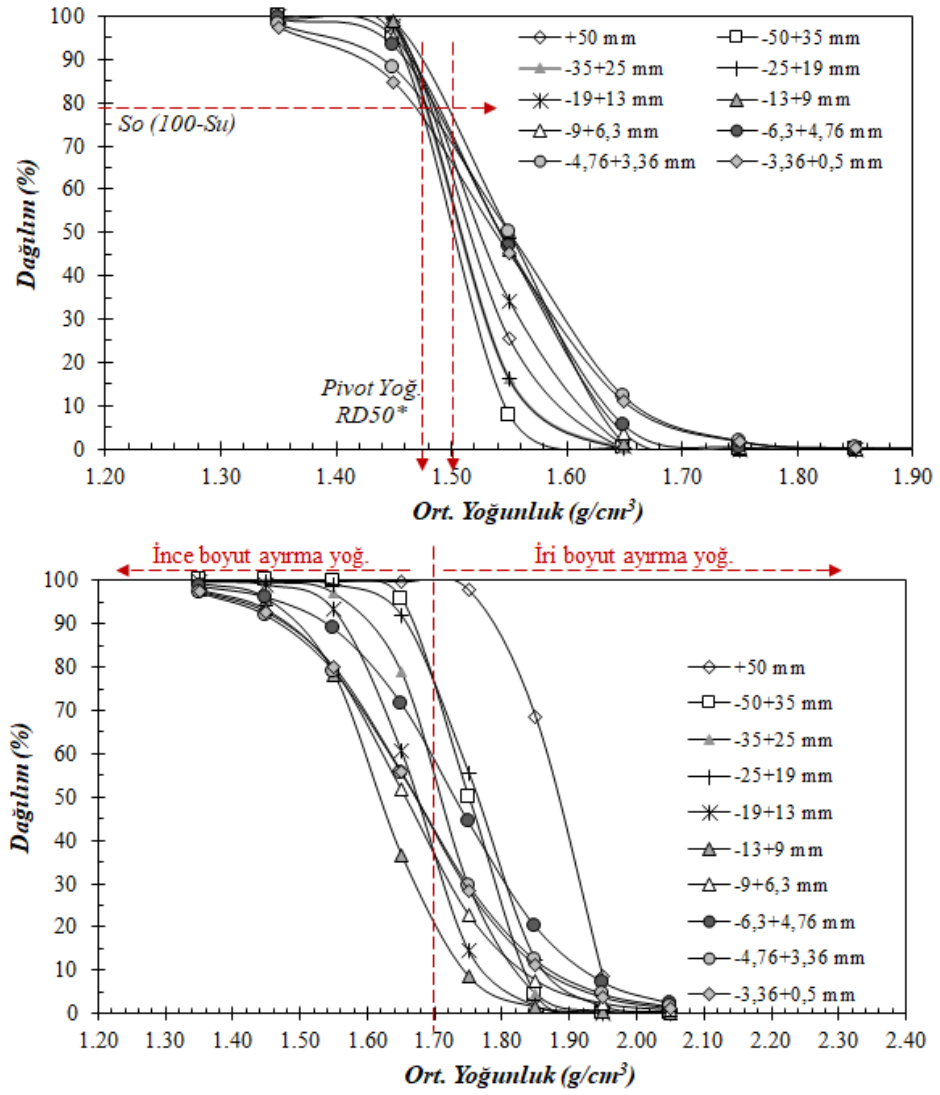
Şekil 4.6'da ise boyuta bağlı tromp eğrileri her bir ünite için tek grafikte özetlenmiştir.



Şekil 4.4 : Boyuta bağlı ayırma yoğunlukları.



Şekil 4.5 : ÜÜAOS birinci ve ikinci ayırma ünitelerinde gözlemlenen ayırma yoğunlukları arasındaki farkın boyuta göre değişimi.



Şekil 4.6 : Boyuta bağlı olarak dağılım eğrileri-özet gösterim.

4.3 Ortam Stabilitesi ve Bölünmesi

Ortam stabilitesinin performans açısından önemi ve olması gerektiği aralıklar daha önceki bölümlerde ifade edilmiştir. ÜÜAOS’da stabilite problemi olup olmadığını kontrol etmek amacıyla beslenen ve zenginleştirme sonrası elde edilen ürünlerle birlikte hareket eden ağır ortamdan da numuneler alınmış (alt ve üst akım ortam yoğunlukları tespiti), yoğunlukları tespit edilmiştir. Dört gün boyunca ölçülen yoğunlukların ortalaması çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu yoğunluklara göre formül 4.3 ve 4.4 kullanılarak her iki ünite için, iki farklı stabilite değeri hesaplanmıştır ve Larcodems için değerler sırasıyla 0,32, %3,42; AOS için ise 0,289, %8,12 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre her iki ünite için de ortamın stabil olduğu tesbit edilmiştir.

Çizelge 4.2 : Besleme ve ürün çıkışlarının ortam yoğunlukları.

Numune adı	Yoğunluk, g/cm ³
Besleme 1	1,493
Üst akım 1	1,442
Alt akım 1 (Besleme 2)	1,674
Üst akım 2	1,538
Alt akım 2	1,827

$$Stabilite\ 1 = SG_u - SG_o \quad (4.3)$$

$$Stabilite\ 2 = (SG_f - SG_o)/SG_f \quad (4.4)$$

Formül 4.3 ve 4.4’de geçen SG_f , SG_u ve SG_o değerleri sırasıyla besleme, alt akım ve üst akım yoğunluklarıdır.

Ortam bölünmesi, performans düşüklüğünün temel sebeplerinden olan yakın yoğunluktaki ve ince boyutlu tanelerin davranışını doğrudan etkilemektedir. Zira herhangi bir akıma yönelmede kararsız olan bu taneler yaklaşık olarak ortam bölünmesine göre davranmaktadır. Ortam bölünmesi daha önce bahsedilen dağılım eğrisindeki pivot yoğunluğundan veya ortam yoğunluklarına bağlı olarak ifade edilen formül 2.1’den bulunabilir.

Larcodems için üst akıma ortam bölünmesi (φ) formülünden;

$$\varphi = \frac{1,674 - 1,493}{1,674 - 1,442} \times 100 = \%78$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değer yaklaşık olarak şekil 4.6'da da gösterilen pivot yoğunluğuna denk gelmektedir. Larcodems için hesaplanan bu değer kabul edilebilir aralıkta olduğu söylenebilir.

AOS için üst akıma ortam bölünmesi benzer şekilde formülden %52,9 olarak hesaplanmıştır. Ancak AOS için berlirgin bir pivot yoğunluk olmadığından, bu yöntemle bir değer bulunamamıştır. Hesaplanan %52,9 değeri, literatürde minimum olması gereken %66 değerinden daha düşüktür. Bu durumda normal olarak alt akıma temiz kömür kaçağı olması beklenir. Ancak hem ölçülen gerçek kül değerlerine göre hem de çizelge 3.4'de verilen hesaplanan dağılımlara göre şistten araürüne malzeme gittiği, bunun da özellikle breakaway boyutu ve altındaki fraksiyonlarda olduğu anlaşılmaktadır. Kömürde mikst karakterinde malzeme oranın çok düşük olmasından dolayı AOS'da üst akıma taşınacak malzeme miktarı da çok düşüktür. Dolayısıyla az miktardaki bu malzemenin üst akıma taşınması için %52,9'luk bir ortam bölünmesi yeterli ve hatta fazla gelmiş olabilir. Burada gelişen mekanizma, az miktarda taşınacak kömür için gereğinden fazla ortam bölünmesinin, santrifüj kuvvetinin yeterince etki edemediği breakaway boyutu ve altındaki ağır malzemeyi de üst akıma taşıması olarak yorumlanmıştır. Tromp eğrileri incelendiğinde de -9 mm boyutunun altındaki fraksiyonlarda eğrinin kuyruğunun 0'a ulaşmadığı görülmektedir. Bu durum genellikle spigot kapasitesinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. İncelenen kömür örneğinde AOS'a aşırı miktarda şist içeren malzeme geldiğinden spigot kapasitenin yetersiz olduğu ve ortam bölünmesinin etkisiyle bu boyuttaki şist tanelerinin araürüne gittiği söylenebilir.

4.4 ÜÜAOS Geometrisinin İncelenmesi

ÜÜAOS ayırıcısı birbirine bağlı olan Larcodems ve AOS ünitelerinden oluşan bir ayırıcıdır. Larcodems ünitesine beslenen ortam ve çalışma şartlarına bağlı gelişen ayırma yoğunluğunda yapılan ayırma sonrasında, Larcodems ünitesi üst akımdan temiz kömür alımı yapılırken, alt akım doğrudan AOS'a beslenmekte ve bu bölümde yine çalışma şartlarına bağlı olarak kendiliğinden gelişen, nispeten Larcodems ünitesindeki ayırma yoğunluğuna göre daha yüksek ayırma yoğunluklarında ayırma yapılmakta ve AOS üst akımından mikst alt akımından ise şist alınmaktadır. Bilindiği üzere merkezkaç kuvveti ile ayırma yapan dinamik ağır ortam ayırıcılarında kömür-şist ayırımının yanısıra, ortamı oluşturan manyetit taneleri de büyüklüklerine göre

ayrılır. Genellikle iri boyutlar alt akıma ince boyutlu manyetit fraksiyonu ise üst akıma yönlendir (segregasyon). Ağır ortamı oluşturan manyetitin fraksiyonel anlamda bu davranışı ortamın viskozitesine bağlı olarak değişim gösterir ve siklon alt akımı-üst akımı ortam yoğunlukları arasındaki farkın büyüklüğünü belirler. Optimum ayırma şartları için bu farkın 0.2-0.5 aralığında olması istenir. Bu durumda ilk ayırma ünitesi olan Larcodems'e beslenen örneğin 1.45 yoğunluğundaki ortam mazlemesi üst akımda yaklaşık 1.35-1.40 g/cm³ civarında gelişir. Eğer optimum ayırma şartlarında üst akım-alt akım ortam yoğunlukları arasındaki fark 0.4 olarak kabul edilirse, ikinci ayırma ünitesi olan AOS'a beslenen ortam yoğunluğu 1.80-1.85 g/cm³ civarında olur. Bu durumda ÜÜAOS'a tek yoğunluklu ortam beslemesi olmasına karşın ayırma iki farklı ortam yoğunluğunda gerçekleştirir. Bu da ÜÜAOS'nın avantajlarından birisidir.

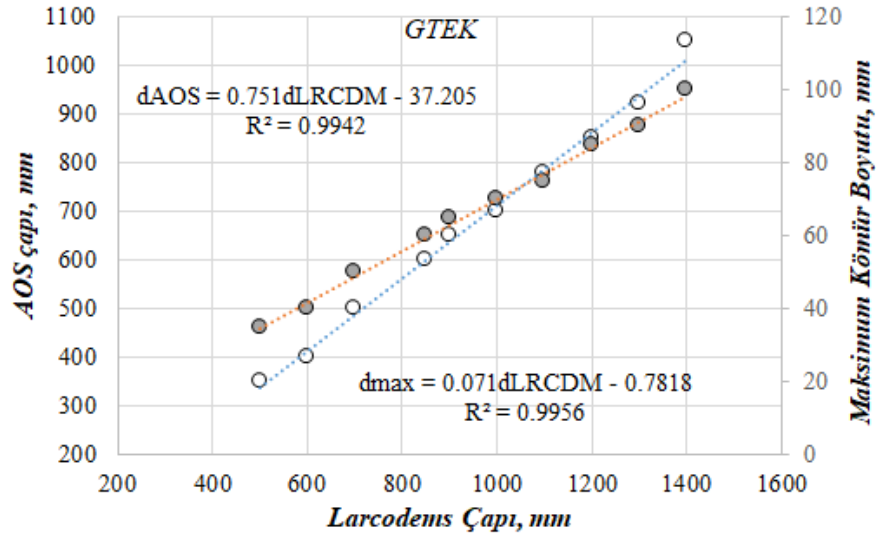
İlk olarak Rusya'da geliştirilen ancak sonraları Çin'de çok yaygın kullanımı olan ÜÜAOS'un Larcodems ünitesi ve AOS üniteleri çapları ve beslenen kömür maksimum boyutu arasında bir ilişki söz konusu olup, Çinli bir üretici tarafından verilmiş olan katalog değerleri çizelge 4.3'te verilmiştir [50]. Boyut ve kapasite ilişkisi aynı zamanda şekil 4.7'de de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 : ÜÜAOS Larcodems ünitesi ve AOS üniteleri çapları ve beslenen kömür maksimum boyutu.

LRCODMS çapı (mm)	AOS çapı (mm)	Maks. Kömür boyutu (mm)	Çalışma basıncı (mPa)	Kapasite (t/h)
1400	1050	100.0	0.250	425.00
1300	920	90.0	0.215	375.00
1200	850	85.0	0.190	340.00
1100	780	75.0	0.170	290.00
1000	700	70.0	0.150	240.00
900	650	65.0	0.140	185.00
850	600	60.0	0.120	140.00
700	500	50.0	0.110	95.00
600	400	40.0	0.090	60.00
500	350	35.0	0.080	37.50

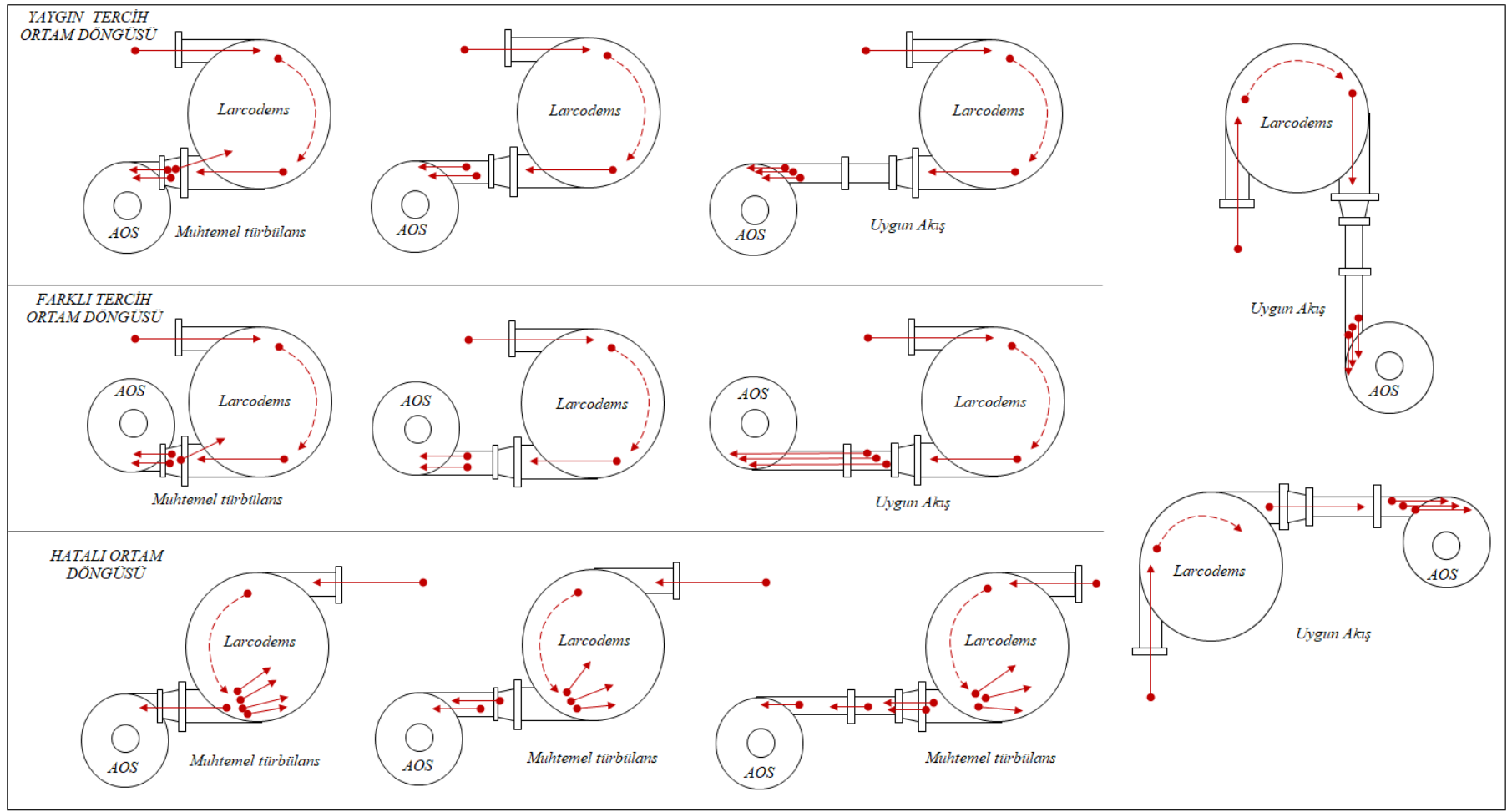
Akkurt Kömür Hazırlama Tesisi maksimum kömür boyutunun 65 mm olduğu yapılan incelemeler sonrasında tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu kömür boyutu için seçilecek olan Larcodems ve AOS çapları; 900 ve 650 mm olarak katalogdan seçilebilir. Bu ölçekte seçilen ÜÜAOS kapasitesi ise yine tablodan 185 t/h olarak belirlenebilir. Katalog değerlerine göre Larcodems ve AOS çapları 900 ve 650 mm olması gerekmekte iken Akkurt kömür hazırlama tesisinde bu çaplar 950 mm ve 650 mm 'dir.

Akkurt Kömür hazırlama tesisinde kömür yıkama kapasitesi 50-75 t/h olup uygun aralıklarda olduğu tespit edilmiştir.



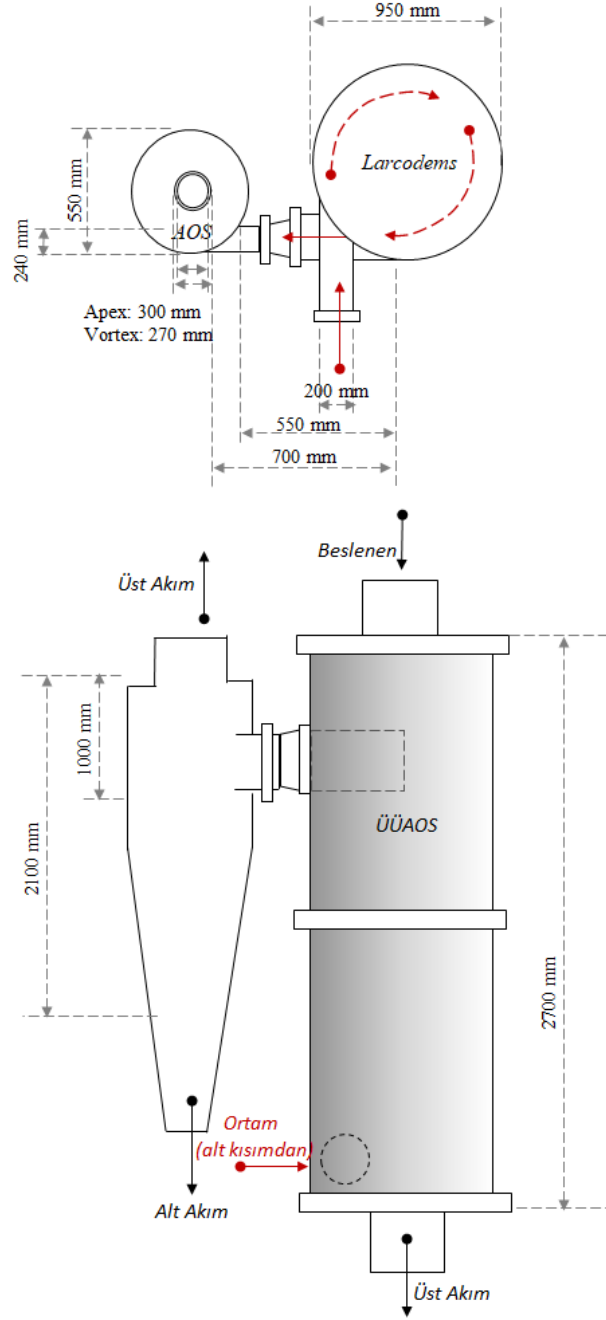
Şekil 4.7 : ÜÜAOS boyut ve kapasite ilişkisi.

ÜÜAOS'da kömür beslemesinin gravite ile yapıldığı durumlarda (gravite beslemeli ÜÜAOS) ağır ortam ve kömür farklı yerlerden ters akım prensibine göre beslenmektedir. ÜÜAOS ünitesinin ilk ayırıcı olan Larcodems kısmından alınan alt akım doğrudan kendisine bağlı olan AOS'a beslenir. İki ayırıcı arasındaki geçişte, ortam akışının rejime ulaşması/ulaşmaması, iki ünite arasındaki mesafeye ve ortamın dönüş istikametlerine ve yönlendirilme tarzına bağlı olarak değişim gösterir. Şekil 4.8'de ÜÜAOS'da Larcodems-AOS arasındaki ortam geçişleri ve ortam akış yönleri resmedilmektedir. Kömür Hazırlama tesislerinde çalışan uzmanlar ile yapılan görüşmelerde akışın türbülans yaratmaması ve sisteme doğru olarak yönlendirilmesi için AOS giriş çapının 5-10 katı arasında bir mesafeden doğrusal olarak beslenmesi gerekmektedir. Bu durumda Larcodems-AOS arasındaki geçiş mesafesi önemlidir.



Şekil 4.8 : ÜÜAOS, Larcodems-AOS üniteleri ortam akış yönleri

Akkurt Kömür Hazırlama Tesisinde kurulu olan ÜÜAOS geometrisi ve ortam akış yönleri Şekil 4.9’da verilmektedir.



Şekil 4.9 : Akkurt Kömür Hazırlama Tesisinde kurulu olan ÜÜAOS geometrisi ve ortam akış yönleri.

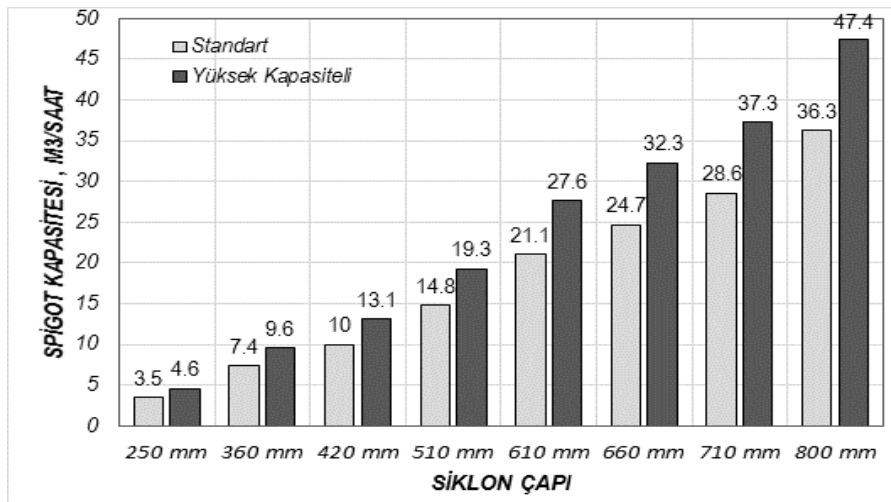
Söz konusu tesiste yapılan ölçümler sonucunda, ÜÜAOS larcodems-AOS geçiş bölgesi uzunluğu 550-700 mm arasında olduğu, AOS giriş çapına (240 mm) göre bu

mesafenin nispeten kısa olduğu söylenebilir. Bu durumda akış rejiminin istenilen düzgünlükte olmayışı ayırma verimini ve etkinliğini olumsuz etkileyebilmektedir.

Ağır ortam siklonu seçimi bir çok faktörün birlikte değerlendirilmesini içermektedir [51]. Ağır ortam siklonu seçimi için;

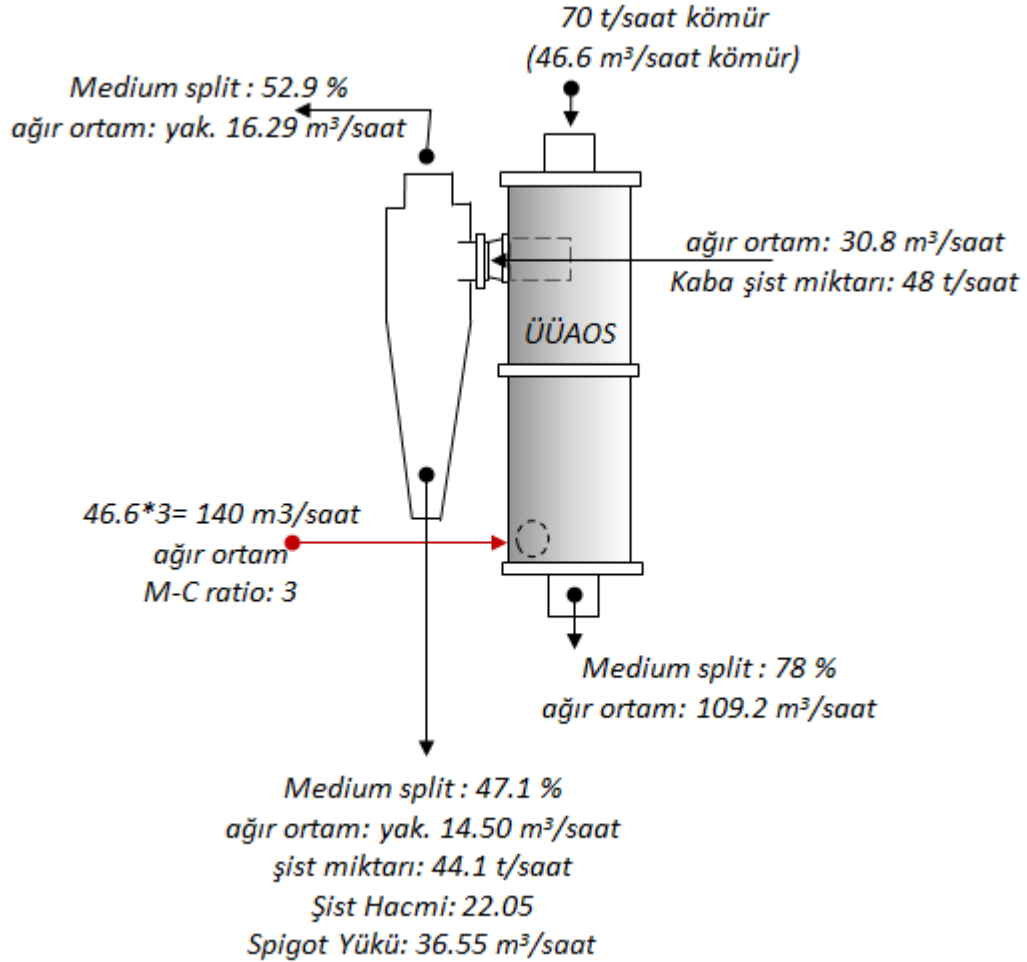
- Besleme miktarı
- Maksimum kömür boyutu (beslenende)
- Ayırma-ortam yoğunluğu
- Kömür/şist oranı
- Hacimsel ortam/kömür oranı (bunun için yakın yoğunluktaki malzeme miktarına bakılır)
- Besleme basıncı
- Kömür boyut dağılımı gibi faktörlerin bilinmesi gereklidir.

Yukarıda verilen faktörlerden en dikkat çeken kömür/şist oranıdır. Doğrudan spigot kapasitesini etkilemektedir. Akkurt Kömür Hazırlama Tesisine beslenen kömür her ne kadar kolay yıkanabilir özellikte olsa da yüksek kül içeriklidir (yaklaşık % 60). Seçilmiş olan siklon çapına ve kapasitesine bağlı olarak atılacak şistin miktarı yani spigot kapasitesi önemlidir. Bu durumda ÜÜAOS sistemindeki ikinci kısmında yer alan AOS spigot kapasitesi irdelenmelidir. Multotec firması kataloglarından alınan verilere göre; siklon çapı-Spigot kapasitesi ilişkisi Şekil 4.10’da verilmektedir [51].



Şekil 4.10 : Multotec firması kataloglarında yer alan farklı çaplardaki siklonlara ait şist atma kapasiteleri.

Akkurt kömür hazırlama tesisinde 550 mm çaplı bir siklon ünitesi ile çalışıldığından; spigot kapasitesi 15-25 m³/saat olarak değerlendirilmelidir. Besleme ve ürünlerdeki akış miktarları şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Spigot kapasitesi hesabı malzeme dengesi.

Yapılan ölçümler sonucunda;

Saatte 70 ton kömür yıkanayan Akkurt Kömür Hazırlama Tesisinde, 1.7-1.75 g/cm³ ayırma yoğunlukları için toplam şist miktarı % 63 yani 44.1 ton/saat tir. Spigot yükü ise 36.55 m³/saat olarak hesaplanmıştır. Söz konusu AOS için spigot kapasitesinin maksimum 25 m³/saat olduğu kabul edilirse; Bu durumda kurulu olan AOS için spigot kapasitesi atılan şist için yeterli değildir. Bu sebeple AOS alt akımı çıkışı, yüksek şist miktarı sebebiyle kalabalık bir ortam oluşturacağından, spigot çapına göre nispeten büyük olan iri şistin bir kısmı siklon üst akımından gitmekte ve bu da iri boyutlar için ayırma yoğunluğunu yükseltmektedir. Bunun yanısıra tromp eğrilerinden tespit edilen

ince boyutlardaki şist kaçağı da spigotun kapasitesinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

4.5 ÜÜAOS Simülasyonu

Tesis performans incelemesi sonrasında elde edilen gerekli veriler kullanılarak ayırma performansı simüle edilmeye çalışılmış ve ürün miktar ve kül içerikleri saptanmıştır. Simülasyonda esas olarak formül 4.1’de de verilmiş olan aşağıdaki whiten eşitliği kullanılmıştır.

$$Y_{üst} = 100 - (100 * \frac{1}{1 + e^{\frac{1.0986 * (RD_{50-d} - RD_i)}{E_{p-d}}}})$$

Bu eşitlikte $Y_{üst}$, üst akımdan (lave) alınan % miktarı, RD_{50} ayırma yoğunluğunu, RD_i ise fraksiyonel yoğunluğu göstermektedir.

Simulasyon işlemi excel programı kullanılarak her boyut fraksiyonu için gerçekleştirilmiştir. Bunun için her bir boyut aralığındaki mazlemenin ayırma yoğunluğu RD_{50-d} ve hata faktörlerinin E_{p-d} belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerleri belirlemek için üç farklı yöntem esas alınmıştır.

Wood Modeli

Wood’a göre simülasyonda, ayırma yoğunluğunu belirlemek için ÜÜAOS besleme ve ürün çıkışlarından alınan ortam yoğunluklarının bilinmesi gerekmektedir. Bu yoğunluklar kullanılarak formül 5.1’de verilen eşitlikle genel ayırma yoğunluğu (RD_{50}^A) değeri hesaplanır. Ardından formül 5.2’ye göre her boyut için ayırma yoğunluğu (RD_{50-d}) hesaplanır. E_p değerini hesaplamak için ise eşitlik 5.3’ü önermiştir [39].

$$RD_{50}^A = 0,360 \times SG_f + 0,532 \times SG_u + 0,274 \times SG_o - 0,196 \quad (4.5)$$

$$RD_{50-d} = RD_{50}^A + 0,088 \times \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{10} \right) \quad (4.6)$$

$$E_{p-d} = \frac{0,037}{d} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde SG_f , SG_u , SG_o ve d değerleri sırasıyla, ayırma yoğunluğu, besleme, alt akım ve üst akım yoğunlukları ile boyutu ifade etmektedir.

Osborne Modeli

Osborne ise E_p değerini belirlemek için f_1, f_2, f_3 ve E_s katsayılarını önermiştir. Bu katsayılar sırasıyla tane boyutu, ekipman boyutu, üretici garanti faktörü ve ayırma yoğunluğu ile ilgilidir.

Ağır ortam tekneleri için f_1 değeri iri kömürler için 0,5, ince kömürler için 1,4 aralığında değişmektedir. Ağır ortam siklonları için ise bu değer 0,5 mm kömür için 2, 10 mm kömür için 0,75 olarak verilmiştir. f_2 ve f_3 değerleri ise 1,1 – 1,3 aralığında değişmektedir. E_s değerinin Larcodem için, $(0,047 \times D_{50}) - 0,05$, ağır ortam siklonu için $(0,027 \times D_{50}) - 0,01$ eşitliğiyle hesaplanır [8].

Burada simülasyon için $f_2 \times f_3$ değeri Larcodems ve AOS için 1,15 olarak alınmıştır. f_1 değerini belirlemek için, boyuta bağlı faktör olduğundan alt sınır değerleri breakaway boyutu seçilerek, verilen sınır değerler arasında üssel fonksiyonla eşitlik ifade edilmiştir. Daha sonra bu eşitlikten yararlanılarak her boyut için f_1 ataması yapılmıştır. f_1 değerleri boyut faktörüne göre belirlendiğinden, tekrardan boyuta bağlı ayırma yoğunluğu hesaplanmamış, her fraksiyon için beslenen ortam yoğunlukları dikkate alınmıştır.

Wiseman Modeli

Wiseman geliştirdiği LIMN simülasyon programının klavuzunda ağır ortam tekneleri ve siklonları için boyuta bağlı E_p ve d_{50} değerleri önermiştir [52].

Larcodems için boyuta bağlı ayırma yoğunlukları belirlenirken, en iri boyutta ayırma yoğunluğu beslenen ortam yoğunluğuna eşit seçilmiş ve alt boyut gruplarına gidildikçe ayırma yoğunluğunu 0,005 artırarak vermiştir. Wiseman E_p değerleri için 4 farklı boyutta varsayımda bulunmuştur. Verilen bu 4 boyut- E_p ilişkisi üssel fonksiyonla tanımlanmış ve buradaki 10 boyut grubu için E_p değerleri bu fonksiyondan hesaplanmıştır.

AOS için ayırma yoğunluklarının boyuta bağlı değişimleri Larcodems'ten farklı olarak verilmiştir. İri boyutlarda ayırma yoğunluğu beslenen ortamın yoğunluğuna eşitken, orta boyutlarda ayırma yoğunluğu 0,02 ile 0,04 arasında geri çekilmiş, ince boyutlarda ise ortam yoğunlundan 0,1 fazla olacak şekilde düzenlenmiştir. E_p değerleri Larcodems'e benzer şekilde klavuzda gösterilen boyut- E_p ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır.

Yukarıda bahsedilen modellere göre hesaplanan ve whiten eşitliğinde kullanılacak parametrelerin özeti Larcodems için çizelge 4.4'te AOS içinse çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Larcodems için simülasyon parametreleri.

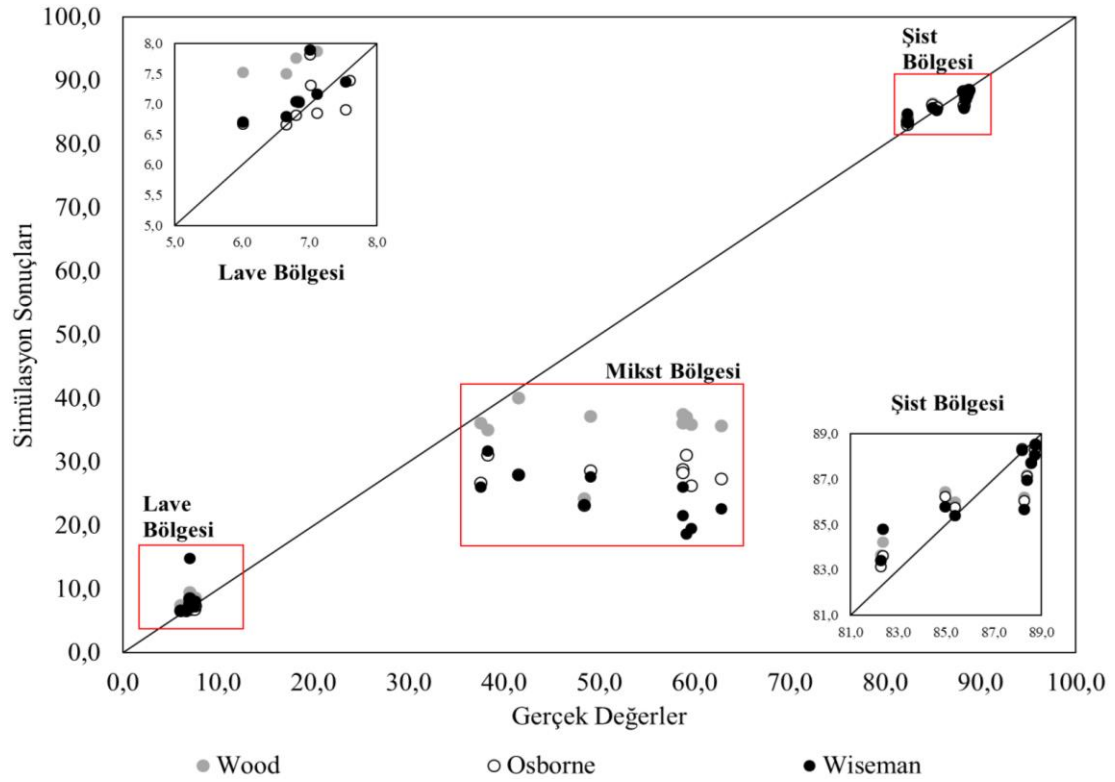
Boyut, mm		Ortalama Boyut, mm	RD _{50-d}			E _p		
-	+		Wood	Osborne	Wiseman	Wood	Osborne	Wiseman
65	50	57,01	1,560	1,493	1,493	0,00065	0,01345	0,01200
50	35	41,83	1,561	1,493	1,498	0,00088	0,01508	0,01500
35	25	29,58	1,561	1,493	1,503	0,00125	0,01693	0,01900
25	19	21,79	1,563	1,493	1,508	0,00170	0,01879	0,02300
19	13	15,72	1,564	1,493	1,513	0,00235	0,02088	0,02800
13	9	10,82	1,567	1,493	1,518	0,00342	0,02389	0,03600
9	6,3	7,53	1,570	1,493	1,523	0,00491	0,02691	0,04500
6,3	4,76	5,48	1,575	1,493	1,528	0,00676	0,03016	0,05600
4,76	3,36	4,00	1,581	1,493	1,533	0,00925	0,03248	0,06900
3,36	0,5	1,30	1,626	1,493	1,538	0,02855	0,03248	0,14200

Çizelge 4.5 : AOS için simülasyon parametreleri.

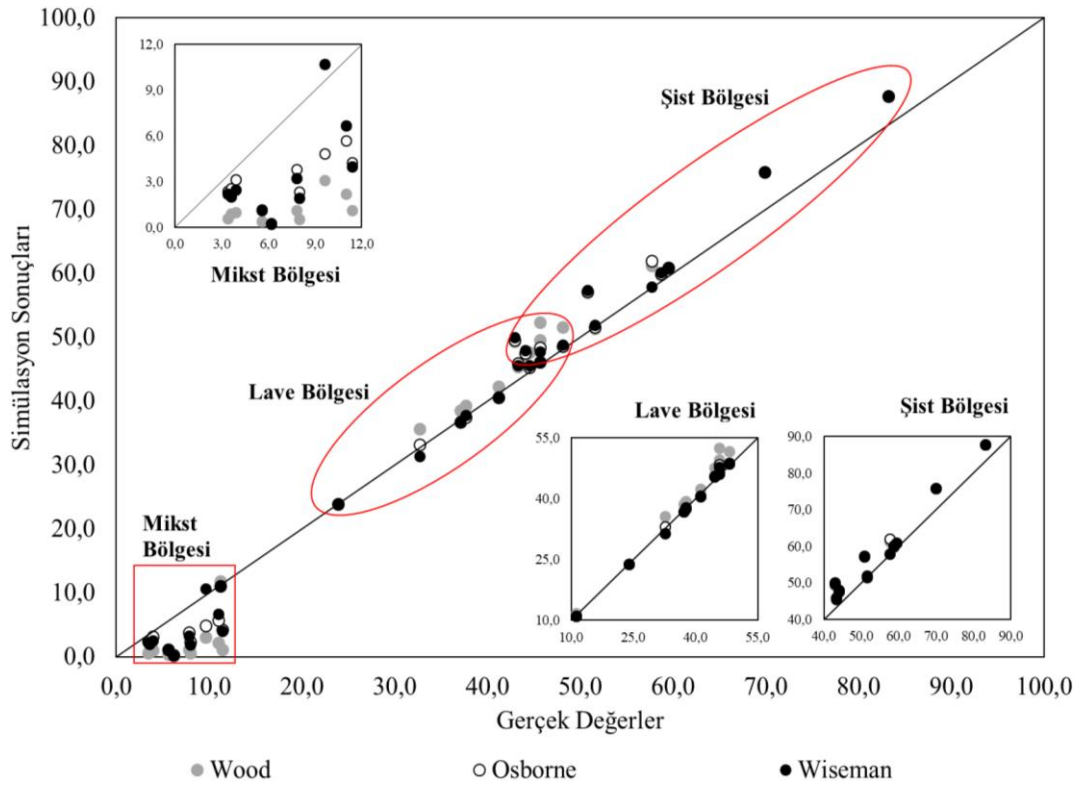
Boyut, mm		Ortalama Boyut, mm	RD _{50-d}			E _p		
-	+		Wood	Osborne	Wiseman	Wood	Osborne	Wiseman
65	50	57,01	1,718	1,674	1,674	0,00065	0,00626	0,01400
50	35	41,83	1,719	1,674	1,674	0,00088	0,00742	0,01600
35	25	29,58	1,720	1,674	1,674	0,00125	0,00905	0,01900
25	19	21,79	1,721	1,674	1,654	0,00170	0,01090	0,02200
19	13	15,72	1,722	1,674	1,654	0,00235	0,01322	0,02600
13	9	10,82	1,725	1,674	1,644	0,00342	0,01670	0,03100
9	6,3	7,53	1,728	1,674	1,639	0,00491	0,02065	0,03700
6,3	4,76	5,48	1,733	1,674	1,634	0,00676	0,02482	0,04300
4,76	3,36	4,00	1,739	1,674	1,684	0,00925	0,02992	0,04900
3,36	0,5	1,30	1,785	1,674	1,774	0,02855	0,04639	0,08400

Üç farklı modelle yapılan simülasyonun sonuçları kül ve miktar açısından gerçek değerlerle kıyaslanmış ve şekil 4.12 ile şekil 4.13'te gösterilmiştir. Genel olarak üç yöntemde birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Lave ve şist kül ve miktarlarında gerçek değerler ile simülasyon değerleri arasında uyum olduğu anlaşılmaktadır. Ancak simülasyondan elde edilen mikstin miktarı ve külü gerçek değerlerden daha düşüktür. Bunun sebebi geliştirilen simülasyon programlarının çoğunlukla standart siklon ölçüleri için geçerli olduğudur. ÜÜAOS'da ise standart ölçülerden çok farklı bir geometri söz konusudur. Aynı zamanda AOS ünitesine aşırı miktarda şist içeren

malzemenin beslenmesi de simülasyonlarda gözetilen çalışma aralıklarının dışında olabilir.



Şekil 4.12 : Gerçek vs. simülasyon kül değerleri



Şekil 4.13 : Gerçek vs simülasyon miktar değerleri.

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

ÜÜAOS'ları Dünya'da ve ülkemizde sıklıkla kullanılmaya başlanmış ve kullanımı sürekli daha da yaygın hale gelmiştir. Dünyada 600'den fazla, Türkiye'de ise 6 adet kömür hazırlama tesisinde uygulamaya girmiş olan ÜÜAOS üretimi Çin'de gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde uygulanan ÜÜAOS'larının büyük bir kısmı ise Türk Patentli olup, ÇMS olarak adlandırılmaktadır. Literatür çalışmalarında ÜÜAOS performansına dair yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır. ÇMS ile yapılan performans değerlendirme çalışmaları ise mevcut değildir. Her ne kadar ağır ortam ayırması olsa dahi, ÇMS'nin ayırma performansının ortaya konulması oldukça önem arz etmektedir.

ÜÜAOS ya da Türk Patentli olup ÇMS olarak ifade edilen ağır ortam sisteminin ayırma performansının incelendiği bu tez çalışması kapsamında; tesise beslenen kömür özellikleri (özellikle boyut dağılımı), ÇMS ayırma performansı ve ÇMS fiziksel özellikleri ve çalışma şartları üzerinde çalışmalar yapılmış ve ÇMS ayırma performansı bu parametrelerce incelenmiş ve ayrıca ÜÜAOS/ÇMS sisteminin ayırma simulasyon modellerine uygunluğu da araştırılmıştır.

- Tesise beslenen kömür numunesi üzerinde yapılan boyut analizleri sonucunda; tesis besleme boyutunun 70 mm altında olduğu tespit edilmiştir. ÜÜAOS'a besleme öncesinde 6 mm elekten elenen tüvenan malzemenin boyut dağılımından, %13 oranında -6 mm boyutlu ince fraksiyon içerdiği yani eleme sırasında yaklaşık bu miktardaki malzemenin iri boyutta elenmeden kaldığı tespit edilmiştir. Tesise beslenen kömür numunesi boyut dağılımı, tesisde kurulu olan ağır ortam ünitesi çalışm performansı ve geometrisi (siklon çapı-breakaway boyutu) açısından da önemlidir. Tesise beslenen kömür numunesi boyut dağılımı içerisinde; siklon çapına bağlı olarak belirlenen breakaway boyut miktarının %10 ve daha altında olması istenmektedir. 950 mm çapındaki Larcodems ünitesi için hesaplanan breakaway boyutunun 4.76 mm civarında olduğu görülmüş olup, tesise beslenen kömür numunesi içerisinde, bu boyut altındaki fraksiyon miktarının %10 civarında olduğu ve ÇMS çapının uygun büyüklükte olduğu görülmüştür.

- Tesise beslenen kömür numunesi üzerinde yapılan kısa analizler sonucunda; tüvenan kömür kalorifik değerinin genel olarak ince boyut gruplarında arttığı, iri boyutlarda 1158 kcal/kg seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. Bu da kömürün kırılğan yapıda olması dolayısıyla ince boyutlara geçtiğini ve bu fraksiyonlardaki kalorifik değer içeriğini arttırdığını göstermektedir. Tesise beslenen kömürün kalorifik değerinin 2509 kcal/kg, kül içeriğinin ise 62.27 cırasında olduğu tespit edilmiştir.
- Tesise beslenen kömür numunesinden belirli zaman aralıklarında alınan temsili numuneler üzerinde yapılan detaylı (fraksiyonel) yüzdürme-batırma testleri ile tüvenan kömürün yıkanabilirliği tesbit edilmiştir. Yıkanabilirlik eğrileri kolay okuma ve değerlendirme yapılabilmesi açısından daha basit yapıda olan M-Eğrileri ile açıklanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda; tüm boyut grupları için, yakın yoğunluk aralığındaki malzeme miktarının yaklaşık olarak % 5’den daha düşük seviyelerde olduğu, tesise beslenen kömürün kolay yıkanabilir özellikte olduğu tesbit edilmiştir. Yıkanabilirlik eğrileri atılacak şist miktarı açısından değerlendirildiğinde; ÜÜAOS/ÇMS iki farklı yoğunlukta iki kademe ayırma yapan bir ayırıcıdır ve ikinci kademede 1.90’a varan yıkama yoğunlukları dolayısıyla atılabilecek şist miktarlarının %45-70 civarında olduğu, %0-5 arasında araürün ve yüksek oranda şist ürünü içereceği tesbit edilmiştir. Bu durumda ÜÜAOS/ÇMS ünitesinin ikinci kısmı olan AOS spigot kapasitesinin belirlenmesi ve uygunluğunun araştırılması gerekmiştir. Bu değerlendirme ilerleyen bölümlerde yapılmıştır.
- ÜÜAOS ayırma performansının belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, malzeme balansının doğru bir şekilde yapılmasıdır. İki ürün veren ayırma ünitelerinde, beslenen ve ürün kül içerikleri vasıtasıyla malzeme balansı kolaylıkla oluşturulmaktadır. Ancak, üç ürün veren ayırma ünitelerinde, kül içerikleri ile malzeme balansının kurulması zorlaşmaktadır. Bu handikapı aşmanın yolu yoğunluk izleyicilerin kullanımıdır. Bir diğer yöntem, ürünlerin ve beslenen malzemenin boyut dağılımları ile malzeme balansının kurulmasıdır. Ancak, her ne kadar diğer ayırma yöntemlerine göre ÜÜAOS’da ufalanma az olsa dahi, tesise beslenen ve yıkanmış ürün boyut dağılımları arasında oluşan farklılıklar sebebiyle boyut dağılımlarının da kullanılması uygun bulunmamıştır. Başka bir yöntem ise kül içeriklerinin

yanısıra, kükürt ve kalorifik değer analizlerinin kullanımı ile malzeme balansının kurulmasıdır. Bu tez çalışmasında yoğunluk izleyici kullanılmadığından, malzeme balansının kurulması işlemi, ayırma sonucu gelişen fraksiyonel yoğunluklardaki mazleme miktarları ile kül ve kükürt içerikleri baz alınarak yapılmıştır. Her ne kadar üç ürünlü bir ayırma ünitesi olsa da bazı yoğunluk fraksiyonlarında sadece iki ürün hatta tek ürün alınmıştır. Tek ürün olan fraksiyonun dağılımı o ürüne %100 kabul edilmiştir. İki ürün olan fraksiyonlarda kül dengesi, üç ürün olan fraksiyonlarda ise kül ve kükürt dengesi dikkate alınarak matris çözümü uygulanmıştır. Elde edilen değerler, ürünlerin mevcut külleri baz alınarak yıkanabilirlik eğrilerinde bu kül içeriklerine karşılık gelen değerler ile eşleştirilmiştir. Yapılan eşleştirme; malzeme balansının kurulmasında seçilen yöntemin doğruluğunu ortaya koymuştur.

- Malzeme balansının kurulmasını takiben yapılan performans değerlendirme sonuçları değerlendirildiğinde; ÜÜAOS ilk ayırma ünitesi olan Larcodems için hesaplanan E_p değerlerinin 0.020-0.058 arasında olduğu, boyut küçüldükçe hata faktörünün 0.020 seviyelerinden 0.058 seviyelerine ulaştığı özellikle 8 mm ortalama tane boyutundan daha küçük boyutlarda E_p değerinin aşırı bir yükseliş göstermeye başladığı tespit edilmiştir. E_p -Kömür boyutu eğrilerinden breakaway boyutunun 6-8 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. Boyuta bağlı olarak ayırma yoğunlukları incelendiğinde ise; boyut küçüldükçe ayırma yoğunluğunun genel anlamda yükseldiği görülmüştür. Ancak bu artışın 1.505 seviyelerinden 1.540'a kadar olduğu, bu artışın nispeten az olduğu bunun da yegane sebebinin sistemde çok fazla kömür incisinin bulunmamasından kaynaklanabileceği tespit edilmiştir. ÜÜAOS ikinci ayırma kısmı olan AOS performansı incelendiğinde; boyuta bağlı olarak hata faktörü, E_p değerinin 0.035-0.100 aralığında olduğu, boyut küçüldükçe hata faktörünün arttığı, benzer şekilde breakaway boyutun 6-8 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. AOS için boyuta göre ayırma yoğunlukları ilişkisi incelendiğinde; beklenenin aksine ayırma yoğunluğunun boyut küçüldükçe azaldığı veya herhangi bir trend izlemediği tespit edilmiştir. Bu durum AOS ayırma koşulları ve gelişimi için kabul edilemeyecek bir durumdur. Bu davranışın sebeplerinin; malzeme balansı kurulmasında bazı hesaplama hatalarından ya

da sistem çalışma şartları ile cihaz geometrisinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Kurulan malzeme balansının doğruluğu bulunan sonuçların M-Eğrisi değerleri ile karşılaştırılması sonucunda anlaşılmıştır. İkinci ayırma ünitesinde mikst ürünün küçük miktarlarda olması ve hesaplam hatası yapılabileceği göz önüne alınarak mikst miktar değişimleri %5 arasında olsa dahi davranışın değişmediği görülmüştür. Bir diğer neden ÜÜAOS geometrisi olabileceği düşünüldüğünden; çalışma basınçları-ortam bölünmesi, Larcodems-AOS bağlantı kısmı mesafesi açısından değerlendirilse dahi ayırma yoğunluğu boyut dağılımı ilişkisini çok etkilemeyeceği düşünülmektedir. Bu davranışın bir diğer nedeninin mikst ürününde toplanan killi kısım olduğu düşünülmektedir. Öyle ki, ayırma sonrası alınan temsili mikst numunesinin kil topakları şeklinde olduğu, yüzdürme-batırma testi öncesinde bu topakların açılması sonucunda, killi kısmın ince olarak kaybedilerek, ortaya çıkan temiz kömüre göre değerlendirme yapılması muhtemel bir ihtimaldir. Örneğin normal şartlarda 1.70 g/cm^3 yoğunluğunda batan mikst numunesi, kili atıldığında 1.70 g/cm^3 yoğunlukta yüzmektedir. Dolayısıyla bu davranış ikinci ayırma ünitesi olan AOS için gelişen yıkama yoğunluklarının düşük görünmesine neden olabilmektedir.

- Yapılan literatür taramalarında, farklı firmalardan elde edilmiş kataloglar incelendiğinde; ÜÜAOS'nde Larcodems-AOS çapları arasında bir uyum olduğu ve beslenende kömür boyutu arttıkça, larcodems ve onunla uyumlu olarak doğrusal oranda (sabit katsayı ile) AOS çapının da arttığı görülmüştür. Bu inceleme araştırmaya konu olan kömür numunesi açısından değerlendirildiğinde sistemin aslında kömür-şist oranına bağlı olarak düzenlenmesi gerektiği saptanmıştır. Öyle ki; Test edilen kömür kül içeriği yüksek (%62) ve mikst oranı düşük bir yapıdadır. Mikstin az miktarda olması bu sistemler için avantaj/dezavantaj olup olmadığı deneysel çalışmalarla irdelenmelidir. ÜÜAOS sistemi içerisinde yer alan Larcodems-AOS çapları uyumunun kabaca % 30 Lave, % 30 Mikst ve %30 şist üzerine olduğu söylenebilir. Oysa ki, test edilen numune de lave oranı %30, mikst oranı %5 ve şist oranı % 65 seviyelerindedir. Bu durumda, AOS seçimi yapılırken dikkat edilen Kömür şist oranının ÜÜAOS uygulamalarında göz ardı edildiği söylenebilir. Multotec firması kataloglarından alınan veriler ışığında 550 mm

çaplı bir AOS için spigot kapasitesinin 25 m³/h civarında olduğu; ancak test edilen kömür numunesi için bu miktarın 36-37 m³/h civarında olduğu ve bu değerin çok yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumda spigot yükü fazla olacağından AOS alt akımdan gitmesi gereken şistin bir kısmının mikste karışabileceği düşünülmektedir. Nitekim, yapılan performans değerlendirmesi sonucunda; mikstin yaklaşık %30 civarında kül içermesi gerekirken, ayırma sonucu ulaşılan mikstin kül içerikleri %50 civarında çıkmıştır. Bu durumun spigot kapasitesinin üstünde çalışma şartları ile oluştuğu düşünülmüştür. Bir sonraki maddede detaylı anlatılacak olan simulasyon çalışmalarında da bu durum ortaya konmuştur.

- ÜÜAOS ayırmasının modellenmesi/simulasyonu ise Klasik AOS ayırma modelleri ve kabulleri kullanılarak Wiseman, Wood ve Osborne'a göre yapılmıştır. Yapılan simulasyon çalışmaları sonucunda ulaşılan ürün miktar ve kül içerikleri, performans testleri ile elde edilmiş gerçek sonuçlarla mukayese edilmiştir. Yapılan mukayeseler sonucunda; her üç simulasyon yöntemine göre, lave ve şistin miktar ve kül içerikleri benzer çıkarken, sadece mikst ürünü miktar ve kül içeriklerinin simulasyon sonucu ulaşılan değerlere göre yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durumda mikst ürün miktarı ve kül içeriğinin artmasının tek sorumlusu, ikinci ayırma ünitesi olan AOS spigot kapasitesinin mevcut kömür örneği ve tesis kapasitesi için yetersiz olmasıdır. Spigot aşırı yüklendiğinden şistin bir miktarı mikste karışarak hem mikstin miktarını hem de kül içeriğini arttırmıştır.

Bütün sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde; performans değerlendirmesi yapılırken, özellikle yüksek oranda kil içeren ürünler için, numune yüzdürme-batırma testine alınmadan önce topaklaşmış kısımların dağıtılmamasına dikkat edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ürünlerle birlikte gelen killi kısmın test öncesinde uzaklaştırılması yıkama yoğunluklarının olduğundan daha düşük görünmesine sebep olmuştur.

ÜÜAOS kömür hazırlama tesislerine sağlamış olduğu basitlik ve ekonomiklik açısından tercih edilen bir ayırma sistemidir. Yapılan performans değerlendirmelerinde ulaşılan düşük E_p değerleri de bunu doğrulamaktadır. Ancak, her ne kadar iyi bir ayırma performansı gösterse dahi; iki devre ayırma yapan (ağır ortam tamburu-AOS) klasik sistemler ile ulaşılabilecek performanslara yaklaşabilmesi için, ayırma şartlarının iyi düzenlenmesi ve ÜÜAOS'un çalışılacak kömür yapısına uygun

olup olmadığı detaylı olarak incelenmelidir. Bu tez çalışması özellikle mikst oranı düşük, şist oranı yüksek olan kömürlerin yıkanmasında, ÜÜAOS uygulamasından önce detaylı projelendirme yapılması gerektiğini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Özbayoğlu, G., & Kemal, M. (2014). Kömür Zenginleştirme Yöntemleri. G. Önal, G. Ateşok, & K. T. Perek (Dü) içinde, Cevher Hazırlama El Kitabı (s. 285-301). İstanbul: Yurt Madenciliği Geliştirme Vakfı.
- [2] Subba Rao, D. V., & Gouricharan, T. (2016). *Coal Processing and Utilization*. CRC Press/Balkema.
- [3] Luttrell, G. H. (2014). Innovation in Coal Processing, R. C. Dunne (Dü) içinde, Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation (s. 277-193). SME
- [4] Hacıfazlıoğlu, H., Toroğlu, İ., & Kurnaz B. (2019). Çift Makaralı Ağır Ortam Yıkama Sisteminin Tanıtılması, *Teknik Rapor*
- [5] Jacobs, H., & de Korte, G. J. (2013). The Three-Product Cyclone- Adding Value to South African Coal Processing. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 859-863
- [6] Zhang, Y. (2015). Pilot Scale Demonstration and Evaluation of Non-Deslimed Non-Classified Gravity Fed HM Cyclone. Master's Thesis.
- [7] Honaker, R. Q. (2007). Coal Preparation and Plant Advancements. Kentucky.
- [8] Osborne, D. (2013). The Coal Handbook: Towards Cleaner Production (Cilt 1 Coal Production). Woodhead Publishing Limited.
- [9] Gupta, A., & Yan, D. (2016). Mineral Processing Design and Operation An Introduction (2 b.). Elsevier.
- [10] Leonard, J. W. (1991). Coal Preparation (5 b.). Colorado: SME.
- [11] Kumar, D., & Kumar, D. (2018). Sustainable Menagement of Coal Preparation. Woodhead Publishing.
- [12] Arslan, V. (2006). Kuru Kömür Hazırlama Yöntemleri. Madencilik, 9-18.

- [13] **Hacıfazlıoğlu, H. (2012).** Kuru Kömür Zenginleştirme Yöntemlerinin Tanıtılması ve Bazı Türk Kömürlerinin Temizlenmesinde FGX Cihazının Denenmesi. *Madencilik*, 29-42.
- [14] **Van HOUWELINGEN, J. A., & de Jong, T. P. (2004).** Dry Cleaning of Coal: Review, Fundamentals and Opportunities . *Geologica Belgica*, 335-343.
- [15] **Şengül, C. O. (2015).** Yerçekimi Beslemeli Üç Ürünlü Ağır Ortam Siklonları ve Avantajları. *Madeniclik türkiye*, 94-100.
- [16] **Zhao, S., Zhang, C., Xu, X., & Yao, W. (2010).** Super-Large Gravity-Fed Three-Product Heavy Medium Cyclone. *Internation Coal Processing Congress* (s. 296-305). SME.
- [17] **Shah, C. L. (1992).** LARCODEMS Separator - Development of Three-product Unit. L. Svarovsky , & M. T. Thew (Dü) içinde, *Hydrocyclones Analysis and Applications* (s. 263-274). Springer.
- [18] **Zhang, S., & Zhou, S. (2013).** The Status and Prospects of Development of Coal Preparation in P.R. China. *Proceeding of the 17th International Coal Preparation Congress* (s. 13-18). İstanbul: TDV Publication.
- [19] **Yu, J. (2012).** Simplified & High Efficient Coal Process Technology for Mongolian Coal.
- [20] **Yongtai, P., Jun, L., Wenchang, L., & Qinggang, G. (2016).** The Golden Decade of the Rapid Development of China's Coal Preparation Equipment. *XVIII International Coal Preparation Congress* (s. 525-530). Saint-Petersburg: Springer.
- [21] **Hacıfazlıoğlu, H., Toroğlu, İ., & Kurnaz B. (2010).** Çift Makaralı Ağır Ortam Ayırma Sisteminin (ÇMS) Zonguldak Kömürünün Temizlenmesi İçin Endüstriyel Ölçekte Uygulanması. *Türkiye 17.Kömür Bildiriler Kitabı*, (s. 111-123). Zonguldak.
- [22] **Xia, Y., Fei, Y., & Zhao, S. (2013).** Washing Study of High Ash Indian Coal With 3-Product Heavy Medium Cyclone Process & Technology. *Proceeding of the 17th International Coal Preparation Congress* (s. 271-276). İstanbul: TDV Publication.

- [23] Liu, B., Sha, J., Liu, Z., Xie, G., & Peng, Y. (2018). Separation of 0.75–0.125 mm Fine Coal Using the Cylindrical Section of a 710/500 mm Three-Product Dense Medium Cyclone. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-12.
- [24] Yu, J., & Zhao, S. (2013). A Complete Hm Deep Cleaning Coal Process Technology & Its Comparison With The Conventional HM Process. *Proceeding of the 17th International Coal Preparation Congress* (s. 265-270). İstanbul: TDV Publication.
- [25] Luttrell, G. H., Barbee, C. J., Bethell, P. J., & Wood, C. J. (2005). *Final Technical Report "Dense Medium Cyclone Optimization"*.
- [26] Korte, G. d., & Engelbrecht, J. (2007). Dense Medium Cyclone. *Designing the Coal Preparation Plant of the Future* (s. 61-71). içinde SME.
- [27] HE, Y. B., & LASKOWSKI, J. S. (1995). Dense Medium Cyclone Separation of Fine Particles Part 2. The Effect of Medium Composition on Dense Medium Cyclone Performance. *Coal Preparation*, 27-49.
- [28] Fourie, P. J., Walt, P. J., & Falcon, L. M. (1980). The Beneficiation of Fine Coal by Dense-Medium Cyclone. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 357-361.
- [29] Napierr-Mun, T. J. (1990). The Effect of Dense Medium Viscosity on Separation Efficiency. *Coal Preparation*, 145-165. doi:10.1080/07349349008905182
- [30] He, Y. (1994). The Effect of Rheology and Stability of Magnetite on the Performance of DMC. *Doktora Tezi*.
- [31] HE, Y., & LASKOWSKI, J. (1994). Effect of Dense Medium Properties on The Separation Performance of Dense Medium Cyclone. *Minerals Engineering*, 209-221.
- [32] Shi, F. (2016). Determination of ferrosilicon medium rheology and stability. *Minerals Engineering*, 60-70.
- [33] Vince, A., Jones, R. K., & Ellison, J. (1992). Appraisal and Optimization of Dence Medium Plant Separations. *Coal Preparation*, 189-207. doi:10.1080/07349349208905216

- [34] Muzenda, E., Abdulkareem, A. S., Mateescu, & Afolabic, A. S. (2012). Effect of Operating Pressure on the Application of Multiple Cyclones in Dense Medium Separation (DMS) Plant. *Particulate Science and Technology*, 92-101.
- [35] O'Brien, M., Firth, B., & McNally, C. (2014). Effect of Medium Composition on Dense Medium Cyclone Operation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 121-132. doi:10.1080/19392699.2014.869924
- [36] Sripriya, R., Banerjee, P., Rao, P., & A. Dutta, M. R. (2001). Critical evaluation of factors affecting the operation of dense medium cyclones treating medium coking coal. *International Journal of Mineral Processing*, 191-206.
- [37] Peatfield, D. (2003). Coal and coal preparation in South Africa - A 2002 Review. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 355-372.
- [38] Meyers, A., Sherritt, G., Jones, A., & O'Keeffe, M. (2014). Large-Diameter Dense Medium Cyclone Performance in Low-Density/High Near-Gravity Environment. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 133-144. doi:10.1080/19392699.2014.869925
- [39] Wood, C. J. (1990). A Performance Model for Coal-Washing Dense Medium Cyclone. *Doktoro Tezi*.
- [40] Magwai, M. K. (2007). Spigot Capacity of Dense Medium Cyclone. *Master Tezi*.
- [41] Magwai, M. K., & Bosman, J. (2007). Fundamentals on the spigot capacity of dense medium cyclones. *Minerals Engineering*, 574-580.
- [42] Chen, J. (2014). Dense Medium Cyclone: From Fundamental Simulation to Process Application. *Doktoro Tezi*.
- [43] Wang, B., Chu, K., Yu, A., Vince, A., Barnett, G., & Barnett, P. (2011). Computational study of the multiphase flow and performance of dense medium cyclone: Effect of body dimensions. *Minerals Engineering*, 19-34.
- [44] Kawatra, S. K., & Young, C. A. (2019). Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. SME.

- [45] HE, Y. B., & LASKOWSKI, J. S. (1995). Dense Medium Cyclone Separation of Fine Particles Part 1. The Effect of Medium Split Ratio on Dense Medium Cyclone Performance. *Coal Preparation*, 1-25.
- [46] Napier-Munn, T. (2018). The dense medium cyclone – past, present and future. *Minerals Engineering*, 107-113.
- [47] Mukherjee, A. K. (2009). A. K. Mukherjee. A New Method for Evaluation of Gravity Separation Process. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 191-210. doi:10.1080/08827500802405756
- [48] Geer, M. R., & Yancey, H. F. (1962). Evaluation of Washery Performance.
- [49] Wills, B. A. (2016). *Mineral Processing Technology* (8 b.). Elsevier.
- [50] Gravity Feed Three Product Dense-Medium Cyclone. (2019). <http://www.mineral-technology.com/products/gravity-feed-three-product-dense-medium-cyclone.html> adresinden alındı
- [51] Bosman, J., Dense Medium Cyclone Selection – It All Adds Up
- [52] Wiseman, D., LIMN: CoalWizard Example Documentation

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yusuf Enes Pural
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.08.1991 / Beyoğlu
E-posta : pural@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012 – Stajyer: Kastamonu/Küre Eti Bakır A.Ş (1 ay)
- 2013 – Stajyer: Eskişehir/Kavak Türk Maadin A.Ş (1 ay)
- 2013 – Stajyer: Giresun/Şebinkarahisar Nesko Maden A.Ş (1 ay)
- 2015-2017 – Mühendis: Türkiye Taşkömürü Kurumu (2.5 yıl)
- 2017 – Araştırma Görevlisi: İTÜ Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü (halen)