

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKAN YATAKLI HAVA BAZLI KÖMÜR YIKAMA SİSTEMLERİNDE
AKIŞKANLAŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİNİN KÖMÜR-İNORGANİK
MADDE AYRIMINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ufuk AYKAÇ

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKAN YATAKLI HAVA BAZLI KÖMÜR YIKAMA SİSTEMLERİNDE
AKIŞKANLAŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİNİN KÖMÜR-İNORGANİK
MADDE AYRIMINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ufuk AYKAÇ
(505111107)**

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505111107 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ufuk AYKAÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AKIŞKAN YATAKLI HAVA BAZLI KÖMÜR YIKAMA SİSTEMLERİNDE AKIŞKANLAŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİNİN KÖMÜR-İNORGANİK MADDE AYRIMINA ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Feridun Boylu**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kenan Çinku
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **30 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu araştırmanın başlangıcından tamamlanması aşamasına kadar danışmanım Sayın Prof. Dr. Mehmet Sabri ÇELİK'e ve bu çalışmayı yapmama olanak sağlayan, çalışmam boyunca değerli fikirleri ile katkıda bulunan Doç. Dr. Feridun BOYLU'ya, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK'a, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hayrunnisa DİNÇER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam boyunca değerli fikirleri ve yardımlarıyla beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşlarım; Caner YİĞİTOĞLU, Yücel ÖZSOY, Cansu Hande CİĞER ve Behzad Vaziri HASSAS'a teşekkür ederim. Hertürlü destekleri için ailem Arif, Emel ve Yıldız AYKAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2014

Ufuk AYKAÇ
(Maden Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Kömür Genel Bilgiler	3
2.1.1 Dünya kömür üretimi	3
2.1.2 Dünya kömür tüketimi	4
2.1.3 Dünya kömür rezervleri	4
2.1.4 Türkiye kömür üretimi	4
2.1.5 Türkiye kömür tüketimi	5
2.1.6 Türkiye kömür rezervleri	6
2.2 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri	6
2.2.1 Kuru kömür zenginleştirme	7
2.2.1.1 Kuru zenginleştirme avantajları ve dezavantajları	7
2.2.2 Kuru kömür zenginleştirme yöntemleri	9
2.2.2.1 İri boyut kömür ayırma üniteleri	9
2.2.2.1.1 Elle ayıklama.....	9
2.2.2.1.2 Döner kırıcılar	10
2.2.2.1.3 Havalı masa.....	10
2.2.2.1.4 FMC seperator.....	10
2.2.2.1.5 Havalı jig.....	11
2.2.2.1.6 FGX ayırıcı	13
2.2.2.1.7 Ağır ortamlı havalı ayırıcılar.....	13
2.2.2.1.8 Optik ayırıcılar	13
2.2.2.2 İnce boyut ayırma üniteleri	14
2.2.2.2.1 Aerodinamik sınıflandırıcılar	14
2.2.2.2.2 Elektrodinamik sınıflandırıcılar	14
2.2.2.2.3 Manyetik ayırıcılar	14
2.3 Akışkanlaştırma Karakteristiği.....	15
3. MALZEME VE YÖNTEM	19
3.1 Kömür Numunesi	19
3.1.1 Kömür numunelerinin boyut dağılımları, kısa analizleri ve değerlendirilmesi.....	19
3.2 Kullanılan teçhizatlar	20
3.2.1 Katlı elek.....	20

3.2.2 Çeneli ve konili kırıcı	21
3.2.3 All air jig	21
3.2.4 Manometre	22
3.2.5 Etüv	23
3.2.6 Bilezikli öğütücü	24
3.2.7 Fırın	24
3.3 Deney Yöntemi.....	25
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
4.1 Kömür Besleme Boyutu, Kömür Nemi ve Pülsasyon Frekansının Akışkanlaştırmaya Etkisi.....	27
4.2 Kömür Besleme Külünün Akışkanlaştırmaya Etkisi.....	30
4.3 Beslenen Kömürde -4+1 mm (İnce Malzeme Fraksiyonu) Oranının Akışkanlaştırmaya Etkisi.....	32
4.4 Akışkanlaştırma Karakteristiklerinde Saptanan Literatürde Yer Almayan Yeni Tanımlamalar.....	33
4.5 Δp Kontrollü Ürün Boşaltma Sisteminin Uygulanabilirliğinin Denenmesi.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR.....	45
EKLER.....	49
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

CDF	: CALA DRYFLOW separatörü
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
IEA	: International Energy Agency
MİGEM	: Maden İşleri Genel Müdürlüğü
MTA	: Maden Tetkik Arama Enstitüsü
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı boyut gruplarındaki kömür ...	20
Çizelge 3.2 : All air jigi kullanma parametreleri.	22
Çizelge 4.1 : Boyut, nem ve farklı pülsasyon frekansına göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.	28
Çizelge 4.2 : -15 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.....	29
Çizelge 4.3 : -15+1 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.....	29
Çizelge 4.4 : -15+4 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.....	30
Çizelge 4.5 : Beslenen kömür kül içeriğine göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.	32
Çizelge 4.6 : Beslenen kömürde -4+1 mm oranı değişimine göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.....	32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Basınç düşüşü (Δp) - akışkanlaştırma hava hızı (U) ilişkisi.	16
Şekil 2.2 : Ayırma etkinliği (%) - birimsiz hava hızı ilişkisi.	18
Şekil 3.1 : -15 mm boyut grubunda hazırlanan kömür numunesi elek analizi.	20
Şekil 3.2 : 3 katlı sallantılı elek.	21
Şekil 3.3 : Laboratuar ölçekli all air jig.	21
Şekil 3.4 : Manometre.	22
Şekil 3.5 : Kesikli allair jig'i jigleme ünitesi ve basınç ölçüm yerleri.	23
Şekil 3.6 : Etüv.	24
Şekil 3.7 : Bilezikli öğütücü.	24
Şekil 3.8 : Kül fırını.	25
Şekil 4.1 : Besleme boyutu, nem ve pülsasyon frekansına bağlı olarak akışkanlaştırma hava hızı belirlenmesi.	27
Şekil 4.2 : Kömür besleme külünün akışkanlaştırmaya etkisi.	31
Şekil 4.3 : -4+1 mm oranının akışkanlaştırmaya etkisi.	33
Şekil 4.4 : Sürekli besleme ve boşaltanın olduğu otojen akışkan yatağın pülsasyon varlığında akışkanlaştırma karakteristiği.	35
Şekil 4.5 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma testlerinde ayırma jig'i ön ve arka hücrelerinde ölçülen basınç düşüşleri.	36
Şekil 4.6 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma testlerinde lave ürünleri kalitesinde kül bazında zamana bağlı olarak değişimi.	37
Şekil 4.7 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma lave ve şist ürünleri kalitesinin kalorifik değer (alt ısı değeri) bazında zamana bağlı olarak değişimi.	39
Şekil A.1 : -15 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlandırmaya etkisi.	50
Şekil A.2 : -15+1 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlandırmaya etkisi.	51
Şekil A.3 : -15+4 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlandırmaya etkisi.	52

AKIŞKAN YATAKLI HAVA BAZLI KÖMÜR YIKAMA SİSTEMLERİNDE AKIŞKANLAŞTIRMA KARAKTERİSTİKLERİNİN KÖMÜR-İNORGANİK MADDE AYIRIMINA ETKİSİ

ÖZET

Kömürlerin zenginleştirilmesi ya da yıkanması genellikle yaş yöntemlerle yapılmaktadır. Uygulanan yıkama işlemlerin büyük bir çoğunluğunun yaş yöntem olması, yani yıkama (ayırma) ortamının su ve kullanılan suyun büyük oranlarda olması, üretilen temiz kömürlerin ve atılan atıkların susuzlandırılması gerek ekonomik gerekse çevresel sorunlar doğurmaktadır. Susuzlandırma aşamalarında kullanılan yüksek oranda flokülantın kömür yıkama maliyetleri üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Bu sebeple, özellikle su problemlerinin yaşandığı Çin, Avustralya ve donma probleminin olduğu Rusya gibi birçok önemli kömür üreticisi ülkede, son zamanlarda kuru kömür üretimi üzerine çalışmalar başlatılmıştır. Türk kömürlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi ve ortaya konulması geniş rezervlerimizin doğru olarak değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, -15,-15+4 ve -15+1 mm boyut gruplarındaki kömür numuneleri Allair Jigi ile havalı ayırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu ayırma işlemlerinde farklı nemlerdeki malzemeye farklı pülsasyon genlikleri ve farklı hava hızları uygulanmıştır. Uygulanan farklı hava hızlarını yataklanma-tabakalanma (sabit/akışkan yatak) üzerinde etkisi, basınç farklarının oluşturduğu eğriler ile ilişkilendirilip, her bir pülsasyon genliği, boyut ve kömür nemi için minimum akışkanlaştırma hava hızı belirlenmiştir. Soma imbat kömürlerine 120, 180, 240 ve 300 rpm (2, 3, 4 ve 5 s⁻¹) pülsasyon genliğinde uygulanan çeşitli hava hızlarına göre, tabakalandırma sırasında basınç düşüşleri ölçülmüştür. Minimum akışkanlaştırma hava hızı belirlendikten sonra, optimum akışkanlaştırma hava hızının tespiti için, zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Akışkanlaştırma hava hızının nem oranına bağlı olarak değiştiği, nem oranı arttıkça akışkanlaştırma hava hızının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca düşük nemlerde ve yüksek pülsasyon frekansı yüksek olduğunda tabakalanmayı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Akışkanlaştırma karakteristiği belirlenmesinde boyutun etkisi araştırıldığında görülmüştür ki malzeme içinde küçük boyut miktarı arttığında hava hızı düşük olduğunda büyük tanelerin hareketlenmesi ve tabakalanması engellenmekte, hava hızı fazla olduğunda ise ince taneler ayırma işlemine maruz kalmadan pnömatik taşınma ile sistemi terketmektedir.. Dolayısıyla malzeme oldukça dar boyut gruplarına ayrılarak zenginleştirme yapılmasının daha etkili olacağı saptanmıştır. Bununla birlikte ürün boşaltma sisteminin akışkanlaştırma özellikleri ile kontrol edilebilirliği de bu tez çalışmasında incelenmiştir.

EFFECT OF FLUIDIZATION CHARACTERISTICS ON COAL-INORGANIC MATERIAL SEPARATION IN AIR BASED FLUIDIZED BED COAL WASHING SYSTEMS

SUMMARY

Coal enrichment processes or so-called coal washing are usually done in water medium. A vast majority of washing processes are wet using the separation medium of water; so the amount of water used in such processes is considerable. As a result, there are problems in dewatering of both produced clean coal and tailings in economic and environmental terms. Moreover, flocculation agents in high dosage used in dewatering processes increase the production costs. In the light of these facts, there is a tendency to processing of coal in dry basis and thus researchers have started on this issue especially in countries such as China and Australia, and in cold countries where there is icing problems like Russia; in all these countries water resource problems are acute.

There is a great deal of work to make the dry beneficiation of coal competitive with conventional wet beneficiation processes. It is important to reveal the applicability of this method in the utilization of Turkish coals. Some technological measures and online data collection systems as well as an optimum process design for specific coal types are required to make this competition realistic as the physical properties of coal and its associated minerals play a major role on the separation efficiency especially in dry coal processing. Dry beneficiation techniques for coal processing such as hand picking, optical or X-Ray sorting, crushing size classification (accelerator) air jigs, air tables, FGX technologies, Akaflow aerodynamic separator, Tribo-electrostatic separator, air-dense medium fluidized bed, electrostatic separation and etc. have many advantages over wet processes in terms of economic and environmental concerns.

Pneumatic beneficiations such as air jigs and air-dense medium fluidized bed have been commercialized and being applied in many countries. The efficiency of these processes basically depend on the difference in characteristics of coal and gang minerals such as density, particle size, shape factors, magnetic and electro static susceptibility. In gravity based dry processing, stratification of coal is achieved through fluidizing and pulsating air, vibration and an oscillating deck in gravity based dry separators. There are a number of studies that show successful use of gravity based dry processing for coal cleaning indicating that dry beneficiation techniques can be well adapted to coals with different characteristics.

In addition to coal processing, these dry processing methods are also open to beneficiation of different minerals such as sand, ferrous minerals, etc. or coal-like materials such as leonardite. In some applications, gravity based dry processing methods were also developed with modified system using different dense media such as sand, magnetite, magnetite fly ash, magnetic pearl and paigeite in separation of both inorganics, pyrite, and Hg. It was also reported that for the optimal separation of

these impurities, using air table or fluidized bed separators, the operational parameters such as vibration amplitude, pulsation frequency, air volume, superficial air velocity, transverse angle, longitudinal angle and also coal properties like size and shape factor should be controlled carefully. Among these operational parameters, pulsation frequencies and superficial air velocity were the most important in governing the density based stratification and separation of the coal particles.

In a fluidized bed system, a pack of solids is converted into a fluidized bed by lifting action of air passing through it. Thus, three stages can be identified in the process of fluidizing a bed of solids based on the velocity of air flow through it; (i) fixed or static bed, where the particles are in direct contact with each other, supporting each other's weight, (ii) expanded/fluidized bed or particulate fluidization where the particles have a mean free distance between particles and the particles are supported by the drag force of the fluid, and (iii) mobilized bed. In fixed bed conditions, the particles remain in stationary contact whereas they are in free motion in a fluidized bed. When the fluid is passed upward through an unrestrained bed of particles, the bed will initially expand slightly to take up a loose packed arrangement. If the flow is increased, the pressure drop across the bed increases. Eventually the pressure drop equals the force of gravity on the particles (weight of the particles) and the particles begin to move. During this period, the porosity increases and the pressure drop rise more slowly than before due to the net effect of increased porosity and velocity. The bed is in extremely loose condition with the particles still in contact. The bed is unstable, the particles begin to lose contact and then adjust their position to present as little resistance to the flow as possible. With further increase on air velocity, the particles are separated and true or complete fluidization begins. By the time this position is reached, all particles are in motion and beyond that situation, the bed continues to expand and the particles move in a more rapid and independent motion. The pressure drop across the particles bed reaches a threshold, referred to as the point of incipient fluidization or minimum fluidization velocity. At that situation, all of the particles have been entrained in the fluid and pneumatic conveying exists.

Dry beneficiation of the tested coals was performed through a Lab scale Allair Jig. Allair jig facility consists of feed, separation (jigging) and powder filtering units. The fresh run of mine (ROM) coals were fed into a manual feed chute associated with belt conveyor and accumulated in the second feed chute where the feed rate was controlled by the stargates. Following the stratification of the feed in jigging cell by the fluidizing air from the fluidizing and pulsed air production and distribution mechanism towards the bottom part, the lighter coal particles floated and discharged automatically from the channel while the discharge of the dense materials through separated channel is controlled by the stargates by varying the rotational speeds. During stratification, a limited amount of powder is ventilated by the filter unit through the ventilation pipe. During the stratification, the operational conditions are adjusted by the control panel. On separation, pressure drops, Δp , for both part of the jigging cells were measured based on the fluidizing air rate by U-tube manometer to determine the minimum fluidizing air velocities, U_{mf} , U_{mfa} , $U_{mf-cohesive}$.

In this study, coal samples from Soma region of Turkey were used in the experiments. Coal samples of -15, -15+4, and -15+1 mm in size were subjected to Allair jigging process. Samples of various moisture contents were cleaned in different pulsation amplitudes and air speeds. The effect of air speed on bedding and layering (fixed/fluid bed) and the impact of pressure difference was investigated. For each pulsation amplitude, particle size, and coal moisture content a minimum

fluidizing air speed is introduced. In Soma-Imbat coal samples, for applied pulsation amplitude of 120, 180, 240, and 300 rpm (2, 3, 4, and 5 s⁻¹) the pressure differences in bedding were measured. After finding minimum fluidizing air speed, coal cleaning experiments were done to determine the optimum air speed. The effect of air speed on bedding and layering (fixed/fluid bed) and the impact of pressure difference was investigated. For each pulsation amplitude, particle size, and coal moisture content a minimum fluidizing air speed was introduced. In Soma-Imbat coal samples, for applied pulsation amplitude of 120, 180, 240, and 300 rpm (2, 3, 4, and 5 s⁻¹) the pressure differences in bedding were measured. After finding minimum fluidizing air speed, coal cleaning experiments were done to determine the optimum air speed. The effect of controlling product discharging system speed on bedding was also investigated in this study.

The results obtained in this thesis have revealed that the negative effects arising from coal and device parameters on the separation efficiency would be brought to the minimum levels if the fluidization air velocity is set based on the variable conditions. It is also found that a controlled product discharge/drainage system would be a possible feature for such an application, with a careful implementation of both fluidization characteristics and separation performance.

1. GİRİŞ

Enerji, insan hayatında giderek önemi artan vazgeçilmez bir olgudur. Günümüz dünyasında ülkelerin gelişmişlik düzeyleri enerji tüketimleri ile paralel seyretmektedir. Enerji tüketiminin yanısıra tüketimden fazlasını üretmek, sanayinin gelişmesi ve ülke ekonomisi açısından önemli etkenlerden birisidir. Enerji kaynaklarının bulunması ve optimum fayda sağlanması gerekmektedir. Enerji kaynaklarından fosil yakıtlar grubunda yer alan kömür büyük öneme sahiptir.

Dünya enerji gereksiniminin %87,9'u fosil yakıtlar grubunda yer alan; petrol, kömür, doğalgaz kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Teknolojideki hızlı gelişmelerle birlikte enerji tüketimi artmakta, bunun sonucunda ise fosil yakıtların tüketim oranı hızla artış göstermektedir. Fosil yakıtlar içerisinde kömür petrolden sonra en yüksek kullanım oranına sahip enerji kaynağıdır. Özellikle kömür rezervlerinin petrol ve doğalgaza göre dünya üzerinde homojen olarak dağılmış olması, kömürün ülkeler açısından stratejik kaynak olarak kullanılmasını sağlamaktadır.

Dünya rezervleri, üretim ve tüketim değerleri baz alındığında; kullanım ömürleri petrol için 52-53 yıl, doğal gaz için 55-57 yıl olurken bu değer kömür için 147 yıl seviyelerindedir. Gerek kullanım ömrü gerekse rezervlerin dünya genelindeki homojen yayılımı dolayısıyla kömür önemli bir yer tutmaktadır.

Değerler incelendiğinde Türkiye'nin yaklaşık 4.5 milyar ton kömür rezervine sahip olduğu bilinmektedir. Ancak yapılan öngörüler Türkiye kömür rezervinin 10 milyar ton civarında olduğunu göstermektedir. Bu rezervlerin ise büyük bir çoğunluğunu linyit karakterindeki kömürler oluşturmaktadır. Mevcut kömür rezervleri dikkate alındığında bu kömürlerin enerji üretiminde kullanılması ve enerji üretimindeki kullanım oranlarının artırılması ülke ekonomisi açısından önemlidir. Ancak Türkiye'deki kömür rezervlerinin büyük bir çoğunluğunun linyit karakterinde olması ve linyitlerin de çok yüksek kül, kükürt ve nem içermeleri, gerek işletme gerekse çevre koşulları açısından bu tür kömürlerin direkt olarak kömürün yanma işlemi öncesinde zenginleştirilmesi, külünün ve kükürdünün uzaklaştırılması ya da bir

başka deyişle yıkanmasını gerektirmektedir. Kömürlerin zenginleştirilmesi ya da yıkanması genellikle yaş yöntemlerle yapılmaktadır. Uygulanan yıkama işlemlerin büyük bir çoğunluğunun yaş yöntem olması, yani yıkama (ayırma) ortamının su ve kullanılan suyun büyük oranlarda olması, üretilen temiz kömürlerin ve atılan atıkların susuzlandırılması gerek ekonomik gerekse çevresel sorunlar doğurmaktadır. Susuzlandırma aşamalarında kullanılan yüksek oranda flokülantın kömür yıkama maliyetleri üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Bu sebeple, özellikle su problemlerinin yaşandığı Çin, Avustralya ve donma probleminin olduğu Rusya gibi birçok önemli kömür üreticisi ülkede, son zamanlarda kuru kömür üretimi üzerine çalışmalar başlatılmıştır. Türk kömürlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi ve ortaya konulması geniş rezervlerimizin doğru olarak değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, linyit rezervleri değerlendirildiğinde; bazı linyit yataklarının yantaş olarak kil içerdiği ve özellikle ağır ortam uygulamalarında yüksek oranda kil dolayısıyla ağır ortam malzemesinin kayıplarının yüksek olduğu bilinmektedir. Türkiye’de özellikle ince kömür yıkama devrelerinde manyetit kaybının 3,5 kg/t seviyelerine ulaştığı bilinmektedir ki, kuru zenginleştirme uygulaması ile manyetit kaybı unsurunun da olmayacağı göz önüne alındığında, yöntemin avantajı daha da önemli hale gelmektedir.

Kuru zenginleştirme işleminin en büyük dezavantajları; neme karşı duyarlılık (nem <9 olmalı), uygulama boyutu (maksimum 50 mm) ve düşük ayırma kapasitesidir. Ancak son zamanlardaki gelişmeler ile ayırma kapasiteleri arttırılmıştır. Yine de havalı kömür ayırıcılarında akışkanlaştırma şartlarının optimize edilmesi, ürün boşaltma sistemlerinin uygun kontrolü ile ayırma kapasiteleri çok daha iyi seviyelere getirilebilir.

Bu çalışma kapsamında, ayırma cihazı ve kömür-kül yapıcı madde özelliklerinin (nem, tane boyutu, beslenen kül içeriği, ince malzeme oranı vs.) havalı jig ünitesinde akışkanlaştırma karakteristiğini ve kömür-kül yapıcı madde ayırmasını ne derece etkilediği incelenmiş ve cihaz ve değişen kömür özelliklerine bağlı olarak en uygun akışkanlaştırma ve ayırma şartları saptanmıştır. Bununla birlikte ürün boşaltma sisteminin akışkanlaştırma özellikleri ile kontrol edilebilirliği de bu tez çalışmasında incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Kömür Genel Bilgiler

2.1.1 Dünya kömür üretimi

Son 12 yıldır kesintisiz artmakta olan küresel kömür üretimi 2011 yılında bir önceki yıla göre %6,6 oranında artarak 7.678 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (IEA, 2012). Buhar kömürü üretimi %6,6 artışla 5.670 milyon ton, kok kömürü üretimi %7,4 artışla 967 milyon ton ve linyit üretimi ise %5,9 artışla 1.041 milyon ton olmuştur. Toplam üretimin yaklaşık %88'i taşkömürü ve %12'si ise linyit kategorisindedir. Böylelikle, dünya kömür üretiminde, son on yılda toplam %55 oranında artış gözükmemektedir. Son on yıldaki ortalama yıllık artış oranı ise %4,5 düzeyindedir.

2011 yılı dünya kömür üretiminin %45,2'sini (3.471 milyon ton) tek başına Çin gerçekleştirmiştir. ABD'nin payı %13,1 (1.004 milyon ton), Hindistan'ın payı %7,6 (586 milyon ton) ve Avustralya'nın payı ise %5,4 (414 milyon ton) oranındadır. Bu ülkeleri; Endonezya (376 milyon ton), Rusya Federasyonu (334 milyon ton) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (253 milyon ton) izlemektedir. Bu yedi ülkenin küresel kömür üretimi içindeki toplam payları %84 düzeyindedir (IEA, 2012).

Genel olarak, kömür üretimleri gelişmekte olan ülkelerde gelişmiş ülkelere göre çok daha yüksek oranda artış göstermektedir. Dünya kömür üretiminde, 2000-2011 döneminde en yüksek artış oranı %374 ile Endonezya'ya aittir ve 2000 yılında 79.4 milyon ton olan kömür üretimini 2011 yılında 376 milyon ton düzeyine çıkarabilmiştir. Aynı dönemde kömür üretim artışları; Vietnam'da %284, Çin'de %149, Kolombiya'da %119 ve Hindistan'da ise %75 olmuştur (IEA, 2012). Buna karşın; İngiltere, İspanya, Yunanistan gibi Avrupa ülkelerinde ciddi üretim düşüşleri yaşanmıştır.

Dünya linyit üretimi bir önceki yıla göre %5,9 artarak 2011 yılında 1.041 milyon ton olmuştur (IEA, 2012). Bu sınıftaki kömürlerin üretimi gelişmiş ülkelerde hızla düşerken gelişmekte olan ülkelerde rekor düzeylerde artmaktadır.

2.1.2 Dünya kömür tüketimi

Dünya kömür tüketimi, son otuz yılda yaklaşık iki kat artmıştır. Son on yıldaki artış oranı %58 düzeyindedir. Tüketim artışı büyük ölçüde Çin'in talebinden kaynaklanmıştır. Bu ülkenin 2000-2011 döneminde kömür talep artışı %165 oranındadır. Aynı dönemde Hindistan'ın talebi %83, Güney Kore'nin talebi %81 ve Türkiye'nin talebi ise %28 oranında artış göstermiştir (IEA, 2012). Kömür tüketiminde 2011 yılında gerçekleşen artış oranı ise son derece yüksektir. 2010 yılında 7.010 milyon ton olan dünya kömür tüketimi %8,4 oranında artarak 2011 yılı sonunda 7.596 milyon ton düzeyine yükselmiştir.

Kömür, elektrik üretimi amacıyla kullanılan yakıtlar arasında en yaygın olanıdır. 1990 yılında dünya toplam elektrik üretiminde %37,4 oranında kullanılan kömür 2010 yılı itibariyle %40,6 oranında kullanılmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından, mevcut politikaların gelecekte de değişmeden devam edeceği varsayımıyla yapılan tahminlere göre kömürün elektrik üretiminde kullanım payı 2030 yılında %41,1 düzeyine yükselecektir (IEA, 2012). Söz konusu tahminlere göre, bu alanda ne doğal gazın ne de nükleer enerjinin kömürün yanına yaklaşabilmesi mümkün görünmemektedir.

2.1.3 Dünya kömür rezervleri

Dünya Enerji Konseyi'nin araştırmalarına göre; işletilebilir kömür rezervi toplam 861 milyar ton büyüklüğündedir. Söz konusu rezervin; 405 milyar tonu antrasit ve bitümlü kömür, 261 milyar tonu alt bitümlü kömür ve 195 milyar tonu ise linyit kategorisindedir. Almanya Federal Yer Bilimleri ve Doğal Kaynaklar Enstitüsü'ne göre, günümüz koşullarında henüz teknik ya da ekonomik bakımdan kazanılabilir olmayan 17 trilyon ton taşkömürü ile 4.2 trilyon ton linyit, kaynak olarak yerkürede kullanılabileceği zamanı beklemektedir (Tamzok, 2011).

2.1.4 Türkiye kömür üretimi

Ülkemiz 2011 yılı satılabilir kömür üretimi; 72.5 milyon ton linyit, 2.6 milyon ton taşkömürü ve 0.9 milyon ton asfaltit olmak üzere bir önceki yıla göre %3,4 artarak toplam 76 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (ETKB, 2013).

1980’li yıllardan itibaren sürekli bir düşme eğilimine giren taşkömürü üretimleri 2004 yılında 1.9 milyon tona kadar gerilemiştir. Bu tarihten sonra tekrar hareketlenen satılabilir taşkömürü üretimi 2011 yılında 2.6 milyon ton düzeyindedir. 2012 yılında ise bir önceki yıla göre %14,3 oranında gerileyerek 2.3 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (TTK, 2013). Zonguldak Havzası’nda 2004 yılından itibaren TTK tarafından rodövans karşılığı özel firmalara kömür üretimi uygulaması başlatılmıştır. 2012 yılında özel sektör tarafından üretilen taşkömürü toplam üretimin yaklaşık %36,4’ü oranındadır (TTK, 2013).

Linyit üretimleri ise, özellikle 1970’li yılların başlarından itibaren, petrol krizlerine bağlı olarak elektrik üretimine yönelik linyit işletmeleri yatırımlarının başlaması ile hızlanmıştır. 1970 yılında 5.8 milyon ton olan linyit üretimi 1998 yılında yaklaşık 65 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Ancak, bu tarihten itibaren özellikle doğal gaz alım anlaşmaları nedeniyle linyit üretimi sürekli azalmış, 2004 yılında 43.7 milyon ton ile en düşük seviyesini görmüştür. Bu tarihten sonra tekrar yükselen linyit üretimleri 2011 yılında 72.5 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (ETKB, 2013).

2.1.5 Türkiye kömür tüketimi

Ülkemizde 2011 yılında tüketilen kömür 26.2 milyon tonu yerli ya da ithal taşkömürü ve 73.9 milyon tonu ise linyit olmak üzere toplam 100.1 milyon ton olmuştur. 2011 yılı taşkömürü arzının %38,6 oranındaki en büyük kısmı elektrik üretiminde ve %25,8 oranındaki kısmı ise ısınma amaçlı olarak tüketilmiştir. Kok fabrikalarının payı %19,8 ve diğer sanayinin payı ise %15,8 düzeyindedir (ETKB, 2013). Taşkömürü tüketiminde elektrik santrallerinin payı giderek artmaktadır

2011 yılında üretilen 72.5 milyon ton linyitin miktar olarak %81,5’i elektrik üretimi amacıyla termik santrallerde tüketilmiştir. Sanayi sektörlerinde kullanım payı %9 ve konut-işyerlerinde kullanım payı ise %9,4 düzeyindedir. Bununla beraber, elektrik üretiminde kullanılan linyitlerin ısı değerleri sanayi ya da ısınmada kullanılan kömürlere nazaran çok daha düşüktür. Toplam ısı değer bazında hesaplama yapıldığında; 2011 yılında tüketilen linyit enerjisinin %65,6’sı elektrik üretiminde, %18,5’i sanayi sektörlerinde ve %15,8’i ise konut ve işyerlerinde tüketilmiştir. Aynı yılda, 865 bin ton asfaltit arzının miktar olarak %46,1’i elektrik üretimi ve %42,3’ü ısınma amaçlı tüketilmiş, kalan kısmı sanayi amaçlı kullanılmıştır. Petrokok

ithalatının tamamı ise önemli kısmı çimento fabrikaları olmak üzere sanayi sektörlerinde tüketilmiştir (ETKB, 2013).

2.1.6 Türkiye kömür rezervleri

Ülkemizde, doğal gaz ve petrol rezervleri oldukça sınırlı olmasına karşın, 512 milyon tonu görünür olmak üzere; yaklaşık 1.3 milyar ton taşkömürü ve 13.4 milyar tonu görünür rezerv niteliğinde toplam 13.9 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır (MİGEM, 2013). Bu miktar dünya kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervlerinin %1,8'ini oluşturmaktadır. Linyit rezervlerimiz ise dünya linyit rezervlerinin %7,1'i büyüklüğündedir. Son yıllarda yürütülen arama ve rezerv geliştirme çalışmaları sonucunda ciddi bir rezerv artışı sağlanmıştır. Yeni sahaların bulunmasına ve rezerv artışına yönelik çalışmalar MTA tarafından sürdürülmektedir.

2.2 Kömür Zenginleştirme Yöntemleri

Brüt kömür, üretim yöntemine ve kömürün fiziksel özelliklerine bağlı olarak, farklı boyut gruplarında olabilir. Genellikle üretimden gelen kömür, maksimum boyutu 150-200 mm civarında olan ve sifıra kadar değişen farklı boyut gruplarını içerir. İri boyuttaki kömürün daha yüksek fiyata satıldığı dikkate alınarak; kömür hazırlamada gereksiz boyut küçültmelerinden kaçınılır. Kömür, genellikle yıkama tesisine girmeden önce 100 veya 150 mm açıklıklı bir elekten elenir. Elek üstü malzeme yapısına göre ya elle ayıklama işlemine veya tamamı 100-150 mm altına kırıldıktan sonra, elek altı malzeme ile birlikte yıkama tesisine verilir.

Yıkama tesisine verilen ve tamamı 100 ve 150 mm altında olan kömür özelliklerine göre ya önceden elenerek yıkanır yada doğrudan yıkanır. Tesiste genellikle iri kömür yıkama için (6, 10 veya 18 mm üstü boyut grubu) ağır ortam üniteleri veya jigler; ince kömür yıkama için (6, 10 veya 18 mm boyut grubu ile 0,5 mm arası) siklonlar, feldispatlı jigler, sarsıntılı masalar ve sabit oluklar; çok ince (toz) kömür yıkama için flotasyon kullanılmaktadır.

Günümüzde modern kömür zenginleştirme tesislerinde 150-0,5 mm arası kömür büyük kapasiteli havalı jiglerde; 0,5 mm altı kömür ise flotasyonla ve spiralle zenginleştirilmektedir. Yine son yıllarda kömür zenginleştirme sektöründeki yeni

gelişmeler sonucunda Larcodem, Jet Flotasyonu ve Kolon Flotasyonu gibi teknikler yeni kurulan tesislerde hızla kullanım alanı bulmuşlardır (Ateşok, 2009).

2.2.1 Kuru kömür zenginleştirme

Kömürlerin kuru olarak zenginleştirilmesi 1930–1990 yılları arasında popülaritesini korumuş ancak düşük ayırma yoğunlukları, ayırma etkinlikleri ve kapasiteleri dolayısıyla popülaritesini zamanla yitirmiştir. Ancak son yıllarda küresel ısınma ve iklim değişikliği nedeniyle ortaya çıkan su sıkıntısı, özellikle Avustralya'nın iç kesimlerindeki meyve-sebze üretim çiftliklerini zor durumda bırakmış ve bu bölgedeki çiftçilerin itirazı ile su kullanımı kısıtlandığından, bu bölgelerde çıkarılan kömürün kuru olarak zenginleştirilmesi gündeme gelmiştir (Donnelly, 1999). Benzer soruna Çin'de rastlanmıştır ve buradaki kömür üreticileri kuru kömür zenginleştirme yöntemlerine yönelmiştir. Bunun yanı sıra, özellikle Rusya gibi iklim koşulları zorlu olan ve kış aylarında donma problemleri yaşanan bölgelerde, kömürlerin yaş olarak külünden arındırılmasında problemler yaşandığından bu bölgelerde de kuru zenginleştirmeye yönelmeler olmaktadır.

Su sıkıntısı yaşayan ya da kış aylarında donma tehlikesiyle karşı karşıya kalınan bölgelerdeki kuru kömür zenginleştirmeye yönelik çalışmalar ve kuru kömür zenginleştiriciler üzerindeki yeni tasarımlar ve yaklaşımlar, kuru zenginleştirme sistemlerinin daha önce ifade edilen düşük kapasite ve düşük ayırma performansı gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmıştır. Aslında gerek işletim maliyetleri gerekse nihai ürün ve üretim sonrası oluşabilecek çevre problemleri birlikte düşünüldüğünde su sıkıntısı ve donma problemlerinin önlenmesinin yanı sıra, kuru kömür zenginleştirme yöntemleri bazı ilave avantajlar da sunmaktadır.

2.2.1.1 Kuru zenginleştirme avantajları ve dezavantajları

Kuru zenginleştirme avantajları;

- Atık çamuru ya da tuz çözeltisi (effluent) üretilmemektedir.
- Eleme, pompalama, vakum filtrasyonu ya da santrifüjleme gibi susuzlandırma proseslerine ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Tikiner, köpük flotasyonu ve flokülant, kollektör gibi pahalı kimyasallar ve yüksek maliyetli proseslere gerek yoktur.

- Kömür hazırlama tesisleri daha küçük ve ucuz olmakta, daha az elektrik enerjisi gerektirmekte ve düşük işletme maliyetleri oluşturmaktadır.
- Düşük nemden dolayı ton konsantre bazında nakliye maliyetleri de düşük olmaktadır.
- Atık havuzlarına ihtiyaç duyulmaması ekolojik anlamda daha çekicidir ve maden alanlarının rehabilitasyonu için gerekli olan maliyetler de azalmaktadır.
- Çok ince kömür taneleri de temiz kömür içinde yer alacağından ürün miktarı da artacaktır. Birçok kömür hazırlama tesisi, yaş yöntemlerle değerlendirilmesi yüksek maliyet gerektirdiğinden ince boyutlu kömürü atığa göndermektedir.
- İri boyutta kömür üretim sahasına yakın yerde yapılacak olan zenginleştirme ile mineral maddenin ayrılması nakliye masraflarının azalmasına sebep olacaktır (Donnelly, 1999).

Bununla birlikte kuru zenginleştirmenin yaş zenginleştirmeye göre bazı dezavantajları da mevcuttur;

- Düşük ayırma etkinlikleri, yani kuru zenginleştirme sonucu elde edilen temiz kömürlerin kül içerikleri yaş yöntemde elde edilen konsantrelere göre daha yüksektir.
- Proses, beslenen kömürün sahip olduğu neme karşı duyarlıdır ve bazı durumlarda termal kurutma işlemi gerekli olmaktadır. Kömürün kesin olarak nemden arındırılmasına gerek yoktur. Sadece ayırmayı etkilemeyecek seviyelere düşürülmesi gerekmektedir. Ancak yapılan çalışmalar, kömürün sadece yüzey neminin giderilmesinin faydalı olacağını belirtmektedir.
- Kuru kömürün özellikle ince boyutta elenmesi çok daha zordur.
- Toz; kırma, eleme ve bazı ayırma prosesleri süresince üretilmektedir dolayısıyla tozun tutulması ile ilgili bazı ilave sistemlere gerek duyulmaktadır.
- Geçmişte düşük kapasiteli olan kuru zenginleştiricilerin kapasitelerinin arttırılması ve modern tesislerdeki yüksek üretim kapasiteleri

karşılayabilmesi ve işletme ve bakım maliyetlerinin minimize edilmesi gerekmektedir.

- Otomatik kalite gözlemlene ve kontrol sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Ancak, aşağıda belirtildiği gibi bu dezavantajların üstesinden gelinebilir (Donnelly, 1999).

Kuru zenginleştirme öncesinde, nemi nispeten çok daha düşük olan iri boyutlu cevherler döner kırıcılar vasıtasıyla kırılarak sert kayalar, şeyl ve kömür serbest hale getirilebilir. Tozlanma probleminin yaşandığı yerlerde özel olarak geliştirilmiş olan ve nemli olarak eleme yapabilen özel elekler kullanılabilir. Beslenen kömürün nemi ile ilgili olarak mikrodalga kurutma ya da alternatif olarak termal kurutma işlemi yapılarak kuru zenginleştirmeye hazır hale getirilebilir. Bu amaçla mikrodalga ile kurutma en etkin yöntem olarak sunulmaktadır. Çünkü kuru zenginleştirmede nem problemi tanelerin birbirlerine yapışmasından ibarettir ve dolayısıyla sıkıntı yaratan nem yüzey nemidir. Bu amaçla uygulanacak olan mikrodalga enerjisi ile sadece su ısıtılacak ve kömürün ekstra ısıtılması da engellenmiş olacaktır (Donnelly, 1999).

2.2.2 Kuru kömür zenginleştirme yöntemleri

Kuru kömür zenginleştiricilerini; iri ve ince boyutta ayırma yapanlar olarak iki gruba ayırmak mümkündür.

2.2.2.1 İri boyut kömür ayırma üniteleri

Kuru kömür zenginleştirmede iri boyutta ayırma yapanlar; elle ayıklama, döner kırıcılar, hızlandırıcı, havalı masa, FMC separatör, havalı jig, FGX ayırıcı, ağır ortamlı havalı ayırıcılar, optik ayırıcılar olarak sınıflandırılabilir.

2.2.2.1.1 Elle ayıklama

Elle ayıklama işlemi iri boyutta yantaş içeren kömür cevherlerinde yavaş hareket eden bir bant üzerinde hareket eden kömür ve yantaşının insan gücü ile tespit edilip ayıklanması işlemidir.

2.2.2.1.2 Döner kırıcılar

Döner kırıcılarla zenginleştirme ise daha çok iri boyutta, kömür ve yantaşın kırılma farklılıklarından yararlanılarak gerçekleştirilen bir ayırma işlemidir. Burada dönen silindirik bir yapı içerisinde yuvarlanma ve ufalanma etkisine maruz kalan kömür içerisinde bulunan yantaş iri boyutlarda kalırken, kömür ufalanarak daha küçük boyutlara geçmekte ve silindirin alt kısmında bulunan elekler vasıtasıyla yantaştan ayrılmaktadır.

Döner kırıcıların biraz daha gelişmişleri literatürde hızlandırıcı (accelerator) olarak tanımlanmaktadır. Burada, kömür kırma ünitesinde kontrollü kırma söz konusu olup, kömür cevheri sistem içerisindeki 2-3 farklı kısımda kırma işlemine tabii tutulmakta ve kırılan kömür ilgili üniteye elendikten sonra iri boyutta kalan kısım bir sonraki daha etkin kırma ünitesine gönderilmekte ve orada da kırma ve eleme işlemi yapılmaktadır. Burada kırma işlemi darbe etkisi ile yapılmaktadır. Honaker ve diğ. yaptıkları çalışmada bu tür bir kırıcı ile yapılan kırma işlemleri sonucunda kömür içerisindeki kül içeriklerinin ince fraksiyonlara geçildikçe %96 dan %55 seviyelerine düşürüldüğünü ve bu tür kırıcılarla seçimli bir kırmanın sağlanabileceğini ifade etmişlerdir (Honaker ve diğ, 2007).

2.2.2.1.3 Havalı masa

Havalı Masa, ilk olarak 1950’li yıllarda uygulanan bir ayırma sistemidir. Burada akışkan ortam (ayırma gerçekleştirilen ortam) havadır. Beslenen kömür masa üzerinde hareketi esnasında statik hava basıncı etkisiyle tabakalandırılmaktadır. Burada temiz kömür, masanın en uç kısmında daralan oluk prensibiyle ayırıcının üst kısmından kazanılmaktadır.

Ayırıcının altından geçen kömür ise yine bir başka daralan oluk kısmı ile 2. temiz ürün olarak alınmaktadır.

2.2.2.1.4 FMC seperator

FMC seperatörü ise bugünkü FGX cihazının daha basit bir şekli olarak tanımlanabilir. Bu tür ayırıcıda, eğimli bir masa yüzeyine beslenen kömür numunesi masa yüzeyi altından verilen pülsasyonlu hava etkisi ile tabakalandırılmakta (ağırlar alt, hafifler üst kısımda) ve numune hareket yönüne paralel yönde verilen gitgel

hareketi ile masa yüzeyi boyuca hareket etmekte, bu esnada akışa dik olarak uygulanan git gel hareketi ile de tabakalanmış kömür numunesi içerisindeki temiz kömür, masanın kısa yüzeyi boyunca alınmaktadır (Honaker, 2007). Masanın uç kısmından ise paralel yöndeki gitgel hareketinden çok daha fazla etkilenen ağır kısmın yer aldığı şist alınmaktadır.

2.2.2.1.5 Havalı jig

Havalı jig ile ayırmaya, 2007 yılında en son haline getirilmiş olan Allair jigi örnek olarak verilebilir. Bu sistemde bir jig kutusu içerisinde bulunan elekli bir yüzey üzerine kömür numunesi beslenmekte ve jigleme işlemi fanlar vasıtasıyla, jig kutusu içerisinde yer alan eleğin alt kısmından verilen hava ile gerçekleştirilmektedir. Jigleme kutusuna hava, sabit akışkanlaştırma havası ve pülsasyon havası olmak üzere iki şekilde verilmektedir. Bu tür jiglerin kapasitesi saatte 100 tona kadar ulaşabilmektedir (Honaker, 2007).

Dünyada Allair jig uygulaması ile ilgili sadece 6 adet uygulama mevcuttur (Snooby ve diğ., 2009). Literatürde havalı jigler üzerinde yapılmış bazı önemli çalışmalar mevcuttur. Sampaio ve diğerleri (2008), yaptıkları çalışmada; Candiota (Brezilya) düşük dereceli kömürlerinden, geniş boyutlarda serbestleşme gösteren pirit nodüllerinin ve killi kısımların uzaklaştırılması amacıyla havalı jig kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda her ne kadar kül içeriğini %51'den %47'ye düşürseler de en büyük başarıyı pirit uzaklaştırılmasında sağlamışlardır. Kükürt içeriğini %1,8'den %0,7 seviyelerine düşürmüşlerdir.

Snooby ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada allair jig ile farklı uygulamalara yer vermişlerdir. Ohio kömürleri ile yaptıkları çalışmada kuru ve yaş zenginleştirme de hemen hemen benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Ancak yaş zenginleştirme sonucunda üretilen çamurların depolanma maliyeti ve çevre problemleri dolayısıyla çok daha fazla maliyet getireceği düşünülmüştür. Ohio kömürlerine (besleme boyutu 2 inç x ½ inç) uygulanan havalı jig ile beslenen de %9,2–26,7 kül içeriğinin %5,1–14,2 seviyelerine düşürmüşlerdir. Ayrıca kükürt içerikleri de %3,2–7,0 seviyelerinden %2,1–3,2 seviyelerine düşürmüşlerdir. Kömür numunelerinin çok az bir kısmı artık olarak atıldığı için kalorifik değer bazında çok önemli oynamalar gözlemlenmemiştir.

Snoby ve diğ. (2009), yayınladıkları çalışmada bir diğer örnek North Dakota linyit kömürlerinin zenginleştirilebilirliğidir. +1/4 inç boyutlu kömürlerin kül içerikleri %22–28 seviyelerinden %11–15 seviyelerine, kükürt içerikleri %2,75–6,0 seviyelerinden %1,94 seviyelerine düşürülmüştür. Kalorifik değerler ise 4900-5400 BTU/pound seviyelerinden 6150-6400 BTU/pound seviyelerine çıkarılmıştır. Bu da allair jiginin linyit yıkamasında ve düşük kül içerikli linyit üretiminde de önemli olduğunu göstermektedir.

Snobby ve diğ. (2009) belirttiği bir diğer çalışma Gulf Coast linyit kömürleri üzerinde olmuştur. Bu kömürlere uygulanan modern jig (allair jigi) ile kül içeriklerinde %10, sülfür içeriklerinde %28, civa içeriklerinde %32'lik düşüş sağlanırken, kalorifik değerde ise %3'lük bir artış sağlanmıştır.

Utah bitümlü Steam Coal üzerinde gerçekleştirilen allair jig uygulaması ile kül içerikleri %18,4 seviyelerinden %12,3'e, kükürt içerikleri %1,18 seviyelerinden %1,13'e düşürülmüştür (Snooby ve diğ, 2009).

İspanya'daki eski sistemde 6 mm üstü kömür için 36 adet havalı masa, 6 mm altı kömür içinse 48 adet yaş sarsıntılı masa bulunmaktadır. Bununla birlikte ince kömür sistemleri için, tikiner, tikiner altı pompa sistemi, tikiner havuzu gibi susuzlandırma işlemlerini gerçekleştiren ilave sistemlerde mevcuttur. İspanya linyitleri üzerinde yapılan uygulamada ise allair jig uygulaması ile eski sisteme benzer teknik veriler elde edilmiş ancak maliyetler çok daha az olmuştur. %50 oranında daha az personel kullanılmış ve bakım maliyetleri çok daha az seviyelerde seyretmiştir. Aynı zamanda da proses çok daha basit bir hale getirilmiştir. Yeni sistemde tüm kömür -30 mm altında sınıflandırılmış ve havalı jige (allair jigi) beslenmiştir (Snooby ve diğ, 2009).

Hindistan bitümlü kömürleri üzerinde gerçekleştirilen allair jig uygulamasında ise, kül içerikleri %42,4–51,9 seviyelerinden, %34,1–40,1 seviyelerine düşürülmüştür. Burada her ne kadar etkin bir ayırma söz konusu olmasa da, bu kömürlerin kullanıldığı demir üretimi işlemi ve bu işlemin ekonomikliği üzerinde önemli gelişmeler sağlamaktadır (Snooby ve diğ, 2009).

Allair havalı jigi yukarıda da bahsedildiği üzere iri ve orta boyutlu kömürlere uygulanmaktadır. 1-2 mm altındaki kömürün bu cihazda zenginleştirilmesi nispeten zor olmaktadır. Ancak son yıllarda ince boyutlu kömürler için de etkin ayırma

yapabilen havalı jigler üretilmektedir. CALA firması ürettiği CDF (CALA DRYFLOW separator) ile -2+0,04 mm boyut aralığındaki kömür numunelerini zenginleştirmektedir (Weitkamper, 2008).

2.2.2.1.6 FGX ayırıcı

FGX ayırıcısı ise son yıllarda Çin’de geliştirilmiş olan kuru zenginleştirme cihazıdır. Bu cihazda, FMC cihazında belirtilen ayırma yöntemi söz konusudur. Ancak masa yüzeylerine bıçaklar yerleştirilmiştir. FGX cihazı ile 6 farklı rölatif yoğunluğa sahip ürünlerin alınması söz konusudur. FGX cihazında, -75+6 mm boyutlu kömürlerin zenginleştirilebilmekte, -6 mm fraksiyon ise ayrı olarak beslenerek zenginleştirilmektedir (Honaker, 2007). Ancak, iri fraksiyonda ayırma yapıldığında, etkin bir ayırma için beslenenin %10-20’lik bir kısmının ortam malzemesi olarak tutulması gerektiği belirtilmiştir. FGX cihazının kapasitesi saatte 10 tona kadar çıkabilmektedir (Honaker, 2007).

2.2.2.1.7 Ağır ortamlı havalı ayırıcılar

Ağır ortamlı havalı ayırıcılarda ayırıcı ağır ortam olarak -38 mikron boyutlu manyetit ya da hematit taneleri kullanılmaktadır. Bu tür ayırıcılara -50+6 mm ve -6+0,5 mm boyutlu kömür numuneleri ayrı ayrı beslenmekte olup, kapasitesi 700000 tpa dır. Bu tür ayırıcılar üzerinde besleme boyutunun arttırılmasına yönelik araştırmalar devam etmekte olup yakın gelecekte 300 mm’ye varan besleme boyutlarında ayırım yapılması planlanmaktadır (Chen ve diğ, 2003).

2.2.2.1.8 Optik ayırıcılar

İri boyutta ayırma yapan kuru zenginleştiriciler bir başka örnek optik ayırıcılardır. Optik ayırıcılar da beslenen numune içerisindeki kömür ve yantaşın renk olarak bilgisayarlarda algılanması ve yantaşın kameralar tarafından tespit edilip, üfleme ile akış içerisinde uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Optik ayırıcılarda 50-150 mm boyutundaki kömür numunesi külünden ayrılabilenekte olup, tesis kapasiteleri 50-100 t/s’e ulaşmaktadır.

2.2.2.2 İnce boyut ayırma üniteleri

İnce boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesine yönelik birçok araştırma enstitüsü ve ticari kuruluş tarafından geliştirilen kuru zenginleştirme teknolojilerini; Aerodinamik sınıflandırıcılar, Elektrodinamik ayırıcılar, manyetik ayırıcılar olmak üzere gruplandırabiliriz (Donnelly, 1999).

2.2.2.2.1 Aerodinamik sınıflandırıcılar

Aerodinamik ayırıcılar, boyutlandırılmış beslenen malzemenin rölatif özgül ağırlığı prensibinden yararlanılarak, bir rüzgâr tüneli içerisinde zenginleştirildiği sistemlerdir. Ağır olan atıklar kısa yörüngelerde hareket ederlerken, hafif taneler uzun yörüngelerde hareket etmektedirler. Bu şekilde farklı yörüngelerde hareket eden kömür ve yantaş, farklı bölmelerde toplanırlar (Donnelly, 1999).

2.2.2.2.2 Elektrodinamik sınıflandırıcılar

Elektrostatik Ayırma konusundaki araştırmalar Yüksek Gerilimli Elektro Dinamik Ayırıcı (EDS) (-2 mm malzeme için) ve elektrostatik ayırıcı (-0.25 mm boyutlu malzeme için) kullanarak kömürün ayrılmasının sağlanması üzerine kuruludur ve bu konuda CSIRO Division of Energy Technology çalışmalar yapmaktadır. Bu ayırma işleminde şu ana kadar elde edilen sonuçlar genellikle az oranda kül uzaklaştırma ile sonuçlanan ve düşük ürün miktarı veren zayıf ayırma işlemini ifade etmektedir. Bu teknoloji henüz ticari anlamda düşünülmemektedir.

2.2.2.2.3 Manyetik ayırıcılar

Nadir Toprak Elementli Yüksek Alan Şiddetli Bantlı Kuru Manyetik Ayırıcılarda (REMS) ayırma, kömür içerisindeki ferromanyetik ya da paramanyetik özellikteki inorganik safsızlıklar olarak nitelendirilen mineral maddenin manyetik bir alandan geçişleri sırasında manyetizma etkisi ile çekilerek manyetik ürün olarak alınması esasına dayanmaktadır. Temizleme etkinliğinin ve kül uzaklaştırma verimlerinin yaş sistemlere göre daha düşük iken, kuru olarak işlem görmüş temiz kömürlerin spesifik enerjileri, kuru olduklarından daha yüksektir (Donnelly, 1999). 360 t/s kapasiteli REMS tesisinin yatırım maliyetleri klasik yaş zenginleştirme tesisi ile karşılaştırıldığı bir çalışma; kuru temizleme tesisinin yaş zenginleştirme tesisine göre yaklaşık %13 daha az yatırım maliyetli olduğunu göstermiştir. Ancak, aynı ısıl değere sahip ince

boyutlu temiz kömür üretiminin işletme maliyetleri açısından, kuru zenginleştirme yaş zenginleştirmeye oranla %50 daha az oranda işletme maliyeti gerektirmektedir.

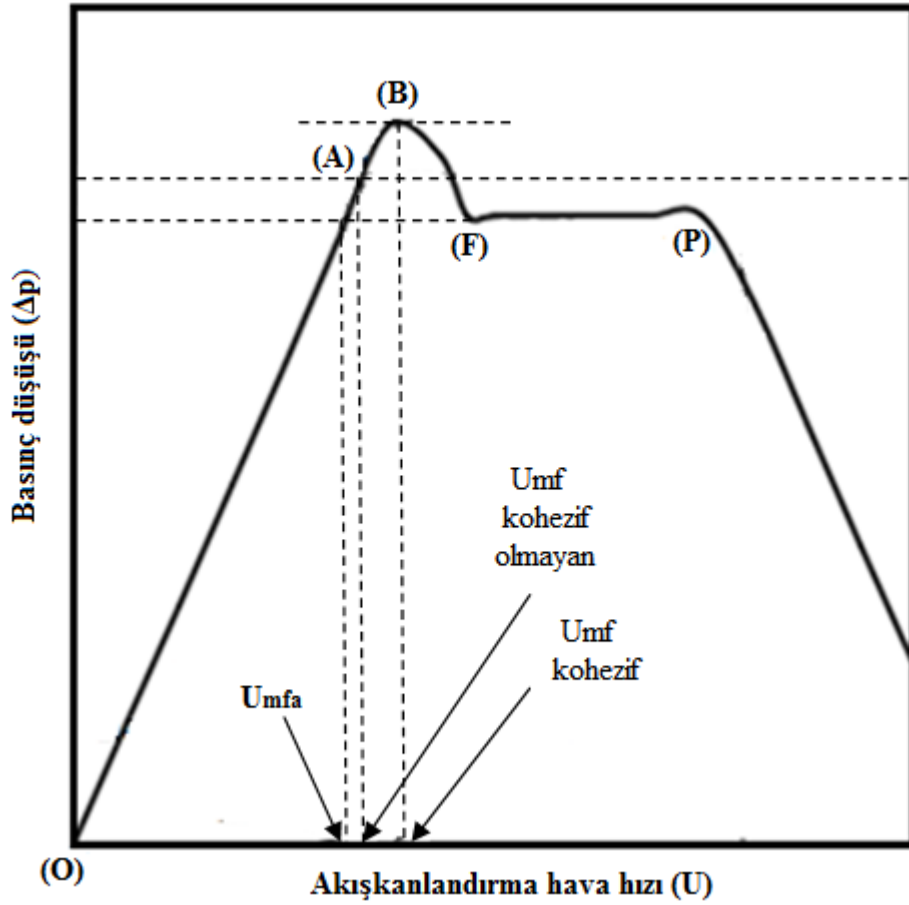
Bu tür ayırmanın bir diğer uygulaması da düşük sıcaklık koklaştırmasını takiben yapılan nadir toprak manyetik ayırıcıları ile zenginleştirme işlemidir. Karbonizasyon adı da verilen düşük sıcaklık koklaştırması esnasında uygulanan ısı etkisiyle kömür içerisinde bulunan pirit (FeS_2), pirotine (FeS) indirgenerek manyetik duyarlılığı artmaktadır. Manyetik duyarlılığı artan pirotin ise REMS ile yapılan ayırma işleminde manyetik ürün olarak yakalanmak suretiyle kömürden uzaklaştırılabilmektedir (Çelik ve Yıldırım, 2000).

2.3 Akışkanlaştırma Karakteristiği

Bir ortamda bulunan farklı tanelerden oluşan katı kütlesi, tanelerin arasında geçen havanın kaldırma etkisiyle akışkan yatak formuna dönüşmektedir. Kaldırma etkisi oluşturan hava hızına bağlı olarak üç tip yataklanma aşaması sözkonusudur; (i) tanelerin birbirleriyle doğrudan temas ettiği ve tane ağırlıklarının diğer tanecikler tarafından desteklendiği sabit yada statik yatak, (ii) tanecikler arasında belirli mesafelerin olduğu, tane ağırlıklarının sürüklenme kuvveti ile desteklendiği genişlemiş/akışkan yatak, (iii) sürüklenme kuvvetinin tane ağırlıklarından daha yüksek olduğu, pnömatik taşınmanın gerçekleştiği mobilize yatak. Akışkanlaştırma karakteristiği ya da sabit, akışkan ve mobilize yatak tanımlamaları genellikle basınç düşüşü-hava hızı grafiğine bağlı olarak belirlenir. Akışkanlandırılan yatağın altında ve üstündeki basınç farkı Δp olarak adlandırılır ve yatağa verilen akışkanlaştırma hava hızına bağlı olarak yatak basınç farkı artar. Böyle bir ilişki Şekil 2.1’de verilmektedir.

Şekil 2.1’de gösterildiği üzere; öncelikle hava hız artışına bağlı olarak lineer bir artış söz konusudur (OA doğrusu). Bu bölgede katı kütlesi sabit/statik yatak olarak tanımlanmaktadır. Hava hızında görülen belirli artışlardan sonra yatağın basınç düşüşü tane ağırlığına eşit hale gelir, yani sürüklenme kuvveti ile tane ağırlıkları dengeye ulaşır ki, bu durumda taneler hareket etmeye başlar. Bu basınç düşüşü-hava hızı grafiğinde, A noktasına karşılık gelmektedir. Bu aşamada katıkütlesinin porozitesi artar ve artan hava hızına bağlı olarak basınç düşüşü de daha küçük ölçekte artar. B noktasına gelindiğinde, yatak aşırı gevşek yapıda olup tanecikler de

kısmen temas halindedir. A ve B noktaları arasında yatak kararsız yapıda olup, taneler aralarındaki teması keser ve akışa direnç gösterir şekilde pozisyon alırlar.



Şekil 2.1 : Basınç düşüşü (Δp) - akışkanlaştırma hava hızı (U) ilişkisi.

Hava hızında görülen sonraki artışlarla, taneler birbirlerinden ayrılır ve gerçek ve tamamlanmış akışkanlaştırma başlar (Zhang, 2012). F noktası bu durumu ifade etmektedir. Bu noktaya ulaşıldığında, bütün taneler hareket halindedir ve bu noktanın ötesinde yatak genişlemeyi sürdürür, taneler daha hızlı ve birbirinden daha bağımsız hareket etmeye başlar. P noktasına ulaşıldığında, hava hızı, tanelerin terminal hızına eşit olur ve bu noktanın üzerindeki hava hızlarında taneler aşırı sürüklenme kuvveti etkisiyle taşınırlar.

Şekil 2.1’de A noktasındaki hava hızı minimum akışkanlaştırma hava hızı (U_{mf}), olarak tanımlanır (Gera ve diğ, 1998; Kawaguchi ve diğ, 1998; Mikami ve diğ, 1998; Wright ve Raper, 1998). F noktasından OA eğrisine, X eksenine paralel olacak şekilde bir doğru çizildiğinde OA doğrusu üzerindeki bu noktadaki hava hızı, görünür minimum akışkanlaştırma hava hızı, U_{mfa} olarak tanımlanmaktadır (Richardson, 1971). U_{mf} -kohezif tanımlaması, kohezif taneciklerin akışkan hale

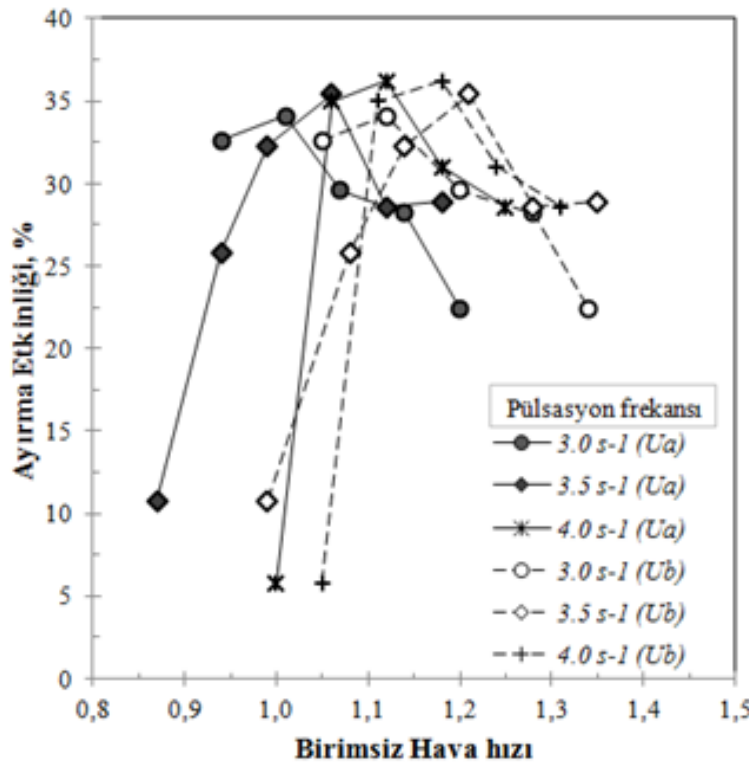
geldiği hava hızlarını ifade etmektedir (Turki ve Fatah, 2008). Kohezif kuvvetler farklı nedenlerden oluşmaktadır. Bunlar sıvı köprüleri, Van der Waals kuvvetleri, elektrostatik ve manyetik kuvvetler olarak örneklendirilebilir. Katı partiküllerin olduğu sistemlerde en önemli etken, taneler arası kuvvet sıvı köprüleri ve Van Der Waals kuvvetleridir (Weber, 2004; Limtrakul ve diğ, 2003; Mikami ve diğ, 1998; Xu ve Yu, 1997; Yu ve diğ, 2000; Bowden ve Tabor, 1956; Stevens ve Hrenya, 2004; Turki ve Fatah, 2008). Akışkanlaştırma karakteristiği, genellikle akışkan yataklı yakma sistemleri, akışkan yataklı kurutucular için çıkarılmaktadır. Akışkan yataklı ayırma sistemlerinde ise akışkan yatak farklı özelliklerdeki malzemelerden meydana gelmekte ve akışkan yatağa ilave olarak uygulanan pülsasyon (kesikli ilave hava) ya da vibrasyon etkisi ile bu farklı malzemeler özgül ağırlıklarına ve boyutlarına göre tabakalanmaktadırlar. Şekil 2.2 incelenecek olursa, ayırmanın olması için yatağın akışkan yatak formunda olması (A-P noktaları arasındaki hava hızları) gerekmektedir. Ancak bu çok geniş bir akışkanlandırma hava hızı bölgesine işaret etmektedir. Özellikle pülsasyon varlığında akışkan yatak şartları bölgesinde en etkin tabakalandırma/ayırmanın hangi şartlarda gerçekleştiğinin ortaya konulması son derece önemlidir. Akışkanlaştırma hava hızlarındaki değişiklikler ayırma etkinliğine doğrudan etki etmektedir. Boylu ve diğ. (2014), kömür-inorganik madde ayırımında kullandıkları sürekli besleme ve ürün boşaltımı olan havalı ayırıcılarda en etkin ayırmanın, Umf-kohezif hava hızına karşılık gelen akışkanlaştırma hava hızı uygulamasında olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.2; Boylu ve diğ, 2014).

Şekil 2.2’den izleneceği üzere, sabit yataktan akışkan yatağa geçiş sağlandığında (Umf) uygun akışkanlaştırma şartları başlamakta ve tabakalandırma ile farklı özgül ağırlıktaki malzemeler farklı bölgelerde tabakalanmaktadırlar. Ancak, sabit yatak şartlarında ve Umf ya da Umin-kohezif değerlerinin üstündeki akışkan yatak şartlarında ayırma etkinliği değişmektedir. Hava hızlarındaki %20 lik değişimler dahi ayırma etkinliğinin %10-15 seviyelerinde düşmesine neden olmaktadır. Akışkan yatak malzemesinin özellikleri (nem, tane şekli, boyut, yatak kalınlığı) akışkanlaştırma karakteristiğini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Ancak, yatak kalınlığının sadece Δp ’nin büyüklüğünü etkilediği, Umfa, Umf-kohezif gibi karakteristikleri etkilemediği düşünülmektedir. Minimum akışkan hava hızına ulaşıldığında, Δp yatak malzemesini oluşturan tanecik ağırlığı ile orantılıdır ve bu durum bubbling state (fokurdama durumu) olarak ifade edilmektedir (Chen ve diğ,

1997; Gupta ve Sathiyamoorthy, 1999; Jackson, 2000). Bu şartlarda Δp 'nin büyüklüğü, aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibi yatak porozitesi (ε), yatak malzemesi özgül ağırlığı (ρp), yatak yüksekliği (H) ve yerçekimi kuvveti (g) ile doğru orantılıdır (Shaul ve diğ, 2013).

$$\Delta p = (1 - \varepsilon) * (\rho p - \rho f) * g * H \quad (2.1)$$

Dolayısıyla minimum akışkanlaştırma hava hızı şartlarında ayırma yapıldığında ve yukarıdaki formül değerlendirildiğinde, yatak özgül ağırlığının Δp ile takip edilmesi olasıdır. Δp ölçümleri ile yatak yoğunluğu kontrolü ve Δp değişimleri ile yatak özgül ağırlığının ayarlanması, havalı ayırma ünitelerinde ürün boşaltma sistemlerinin kontrollü hale gelmesine olanak sağlayacaktır.



Şekil 2.2 : Ayırma etkinliği (%) - birimsiz hava hızı ilişkisi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Kömür Numunesi

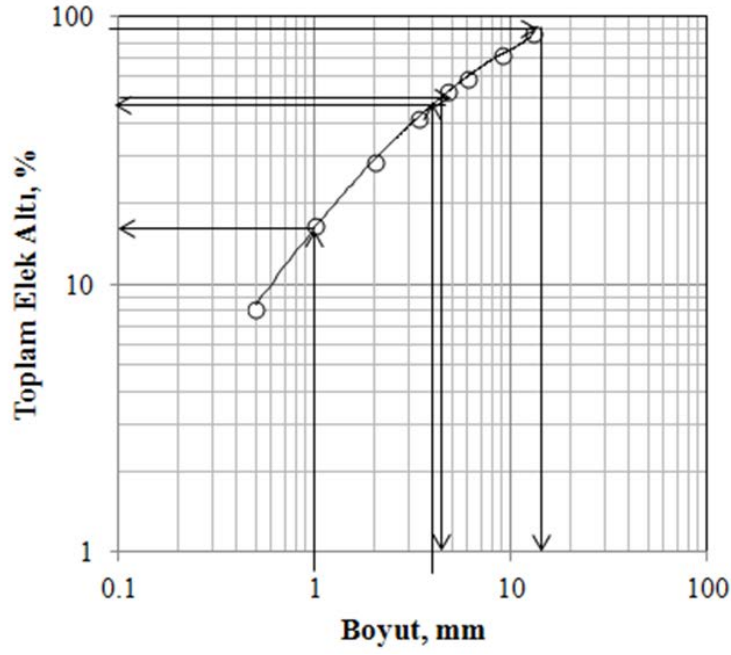
Deneysel çalışmalarda Soma-İmbat Yıkama Tesisine giren ve -150 mm boyutunda olan kömür numunesi kullanılmıştır. -150 mm boyut grubunda olan kömür numunesi öncelikle 15 mm'den elenmiş ve +15 mm boyutu grubu çeneli ve merdaneli kırıcılardan kontrollü geçirilerek numunelerin tamamı 15 mm altına geçirilmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere 15 mm altına geçirilen numuneler -15, -15+4, -15+1 mm boyut gruplarına eleme sistemiyle ayrılmıştır. -15 mm boyut grubunda malzeme hazırlanırken, kontrollü eleme kırma yapılarak, kömür numunesinin çok inceye geçmesi önlenmiştir.

3.1.1 Kömür numunelerinin boyut dağılımları, kısa analizleri ve değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan, 15 mm altına kırılan kömür numunesinin elek analizi yapılmış ve elek altı eğrisi Şekil 3.1'de sunulmuştur. -15, -15+4, -15+1 boyut gruplarından alınan numunelerle yapılan kısa kömür analiz sonuçları Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Şekil 3.1'den izlendiği üzere; -15 mm boyut grubunda hazırlanan kömür numunesinin boyut dağılımı incelendiğinde, d_{90} ve d_{50} boyutlarının 13 ve 5 mm olduğu saptanmıştır. Ayrıca -1 mm malzeme oranının %17, -4 mm malzeme oranının ise %47 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Kısa analiz sonuçlarının verildiği Çizelge 3.1 incelendiğinde ise; -15 mm boyut grubunda %43,15 seviyelerinde olan kül içeriğinin -15+1 mm 'de %45,48'e çıktığı, -15+4 mm boyut grubunda ise %41,77 seviyelerine düştüğü gözlemlenmiştir. -15 mm'ye oranla, -15+1 mm boyutunda gözlemlenen yüksek kül oranının daha çok kömürün ufalanarak ince boyuta geçmesi ile oluştuğu düşünülmüştür. -15+4 mm boyut grubunda gözlemlenen düşük kül içeriğinin ise killi kısmın uzaklaştırılması sonucu oluştuğu varsayılmıştır.



Şekil 3.1 : -15 mm boyut grubunda hazırlanan kömür numunesi elek analizi.

Çizelge 3.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan farklı boyut gruplarındaki kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları.

	-15 mm	-15+1 mm	-15+4 mm
Kül, %	43.17	45.48	41.77
Uçucu Madde, %	38.81	36.33	38.30
Sabit Karbon, %	18.02	18.19	19.93
Toplam S, %	0.61	0.58	0.49
Yanar S, %	0.58	-	-
Kalorifik Değer, Kcal/kg	2868	2743	2854

3.2 Kullanılan teçhizatlar

3.2.1 Katlı elek

Kömür numuneleri hazırlanırken, Şekil 3.2’de verilen yaklaşık 1.5 m² yüzey alanlı, 3 katlı (15 mm, 4 mm ve 1 mm) sallantılı elek sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.2 : 3 katlı sallantılı elek.

3.2.2 Çeneli ve konili kırıcı

Deneylerde kullanılan laboratuvar tipi çeneli kırıcının giriş açıklığı 200 mm, çene çıkış açıklığı 50 mm olarak ayarlanarak +50 mm boyutundaki tüvenan kömür deneylerde kullanılmak üzere -50 mm boyutuna kırılmıştır. Daha sonra laboratuvar ölçekli küçük çeneli kırıcı ve konili kırıcı kullanılarak kömür numunesinin tamamı -15 mm boyut grubuna getirilmiştir.

3.2.3 All air jig

Deneylerde Şekil 3.3’de görülen ve 600 kg/saat kapasiteli laboratuvar tipi All Air Jig (Allmineral) kullanılmıştır. Bu havalı jige ait çalışma parametleri Tablo 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.3 : Laboratuvar ölçekli all air jig.

Çizelge 3.2 : All air jigi kullanma parametreleri.

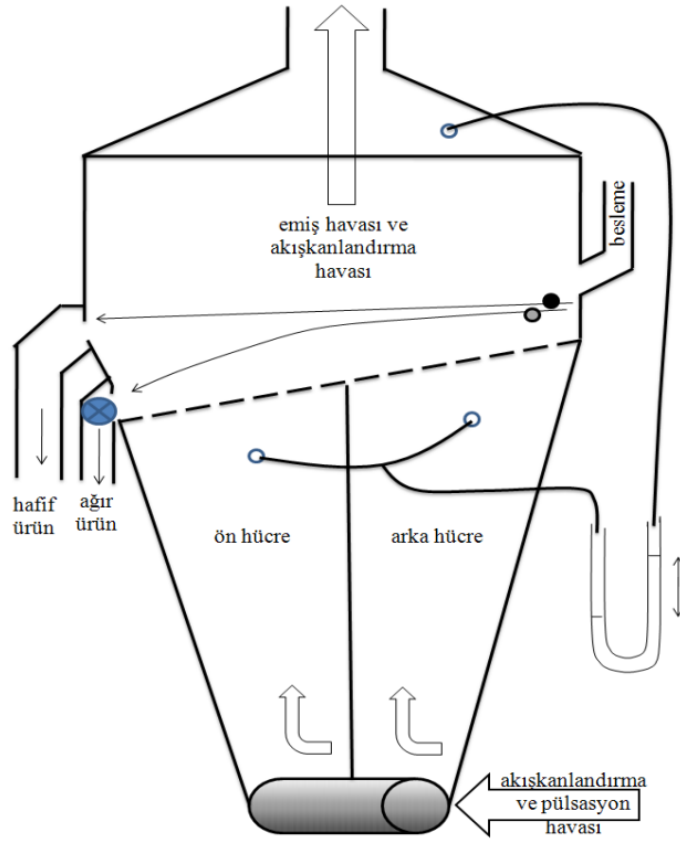
Besleme	(kg)	30-40
Hava Hızı	(%)	0-80
Konveyör Hızı	(%)	38-40
Pulsasyon Genliği	(rpm)	120-300
	(s ⁻¹)	2-5
Hücre Tekeri Besleyici	(%)	16,1
Hücre Tekeri Boşaltma	(%)	17,1
		-15
Tane Boyutu	(mm)	-15+4
		-15+1

3.2.4 Manometre

All Air Jiginde yapılan ayırmalar süresince jig yatak önü ve arkasında oluşan basınç farklarını ölçmek için Şekil 3.4’de görülen manometre jige Şekil 3.5’de gösterildiği üzere (jigleme ünitesi tabakalaşma üstü ve jig hücresi elek altı kısımlara ön ve arka) bağlanmıştır. Basınç düşüşü ölçümleri mbar cinsinden ölçülmüştür.



Şekil 3.4 : Manometre.



Şekil 3.5 : Kesikli allair jigi jigleme ünitesi ve basınç ölçüm yerleri.

3.2.5 Etüv

All Air Jig ile yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ürünlerden, kül analizi için alınan yaklaşık 100'er gramlık lave, şışt ve tekne numuneleri bilezikli öğütücüye sokulmadan önce Şekil 3.6'da görülen Etüv vasıtası ile 105 °C'de 4 saat bekletilmiştir. Numunelerin bekletilme sebebi ayırım sonrası bilezikli öğütücüde yapışmalara neden olan bünyedeki nemin atılması ve kül analizinde tamamen kurutulmuş ürünlerin kullanılacak olmasıdır.



Şekil 3.6 : Etüv.

3.2.6 Bilezikli öğütücü

Kül analizleri -15 mm, -15+1 mm, -15+4 mm boyutlarında gerçekleştirilen kuru zenginleştirme ürünleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup, analizler öncesinde tüm numuneler, Şekil 3.7’de verilen bilezikli öğütücü kullanılarak -100 mikron boyutuna öğütülmüştür.



Şekil 3.7 : Bilezikli öğütücü.

3.2.7 Fırın

Bilezikli öğütücü ile öğütülen malzemelerin hassas terazilerde tartımları alınmıştır. 0,5-1,0 gram miktarında tartılıp krozelere konulan kömür numuneleri, Şekil 3.8’de görülen Protherm marka kül fırında 825 °C sıcaklıkta 4 saat süre ile yakılmış ve kül analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 : Kül fırını.

3.3 Deney Yöntemi

-15, -15+4 ve -15+1 mm boyut gruplarındaki kömür numuneleri Allair Jigi ile havalı ayırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu ayırma işlemlerinde, farklı nemlerdeki malzemeye farklı pulsasyon genlikleri ve farklı hava hızları uygulanmıştır. Bu pulsasyon ve hava hızının etkisi ile hafif olan lave taneleri yatağın üstüne çıkma eğilimi gösterirken şist taneleri ise tabakalandırma esnasında daha ağır olmalarından dolayı jig ünitesi tabanında kalma eğilimi göstermişlerdir. Uygulanan farklı hava hızlarını yataklanma-tabakalanma (sabit/akışkan yatak) üzerinde etkisi, basınç farklarının oluşturduğu eğriler ile ilişkilendirilip, her bir pulsasyon genliği, boyut ve kömür nemi için minimum akışkanlaştırma hava hızı belirlenmiştir. Soma imbat kömürlerine 120, 180, 240 ve 300 rpm (2, 3, 4 ve 5 s⁻¹) pulsasyon genliğinde uygulanan çeşitli hava hızlarına göre, tabakalandırma sırasında basınç düşüşleri ölçülmüştür.

Tabakalandırmada jig ünitesinin ön ve arka kısımlarında yapılan basınç ölçümleri sonucunda minimum akışkanlaşma havası olarak belirlenen hava hızı; jig ünitesinin arka kısmında ölçülen basıncın en yüksek olduğu noktaları temsil etmektedir.

Minimum akışkanlaştırma hava hızı belirlendikten sonra, optimum akışkanlaştırma hava hızının tespiti için, zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiş olup, deneyler sonucunda elde edilen ürünlerden numuneler alınmıştır. Lave, ve şistten alınan numuneler önce etüvde 4 saat süresince 105 °C sıcaklıkta bekletilerek kurutulmuş,

sonrasında ise bilezikli öğütücü ile -100 mikron boyutuna öğütülmüştür. Öğütülen numuneler daha sonra tekrar 2 saat etüvde bekletildikten sonra 0,5-1 gramlık örnekler alınarak krozelere konulmuş ve hassas terazide tartılmıştır. Tartılan numuneler 825 °C fırında yakılmıştır. Kül miktarlarının %'ce belirlenmesi için aşağıdaki işlem uygulanmıştır.

$$\%Kül = \frac{(Kroze+kül)-(Kroze)}{(Kroze+Numune)-(Kroze)} \quad (3.1)$$

Kül miktarları (%) hesaplandıktan sonra bu veriler kullanılarak, yanabilir verim, kül uzaklaştırma verimi ve ayırma etkinlikleri (%) hesaplanmıştır. Bu hesaplanmalarda kullanılan formüller aşağıda verilmiştir:

$$Yanabilir Verim(\%) = \frac{C \times (100-c)}{F \times (100-f)} \quad (3.2)$$

$$Kül Uzaklaştırma Verimi(\%) = \frac{T \times t}{F \times f} \quad (3.3)$$

$$Ayırma Etkinliği(\%) = Yanabilir Verim - (100 - Kül Uzaklaştırma Verimi) \quad (3.4)$$

C = Lave miktarı, %

c = Lave külü, %

T = Şişt miktarı, %

t = Şişt külü, %

F = Beslenen miktarı, %

f = Beslenen malzeme külü, %

$$B \times b = (L \times l) + (\$ \times \$) \quad (3.5)$$

L = Lave miktarı, %

l = Lave külü, %

\$ = Şişt miktarı, %

\$ = Şişt külü, %

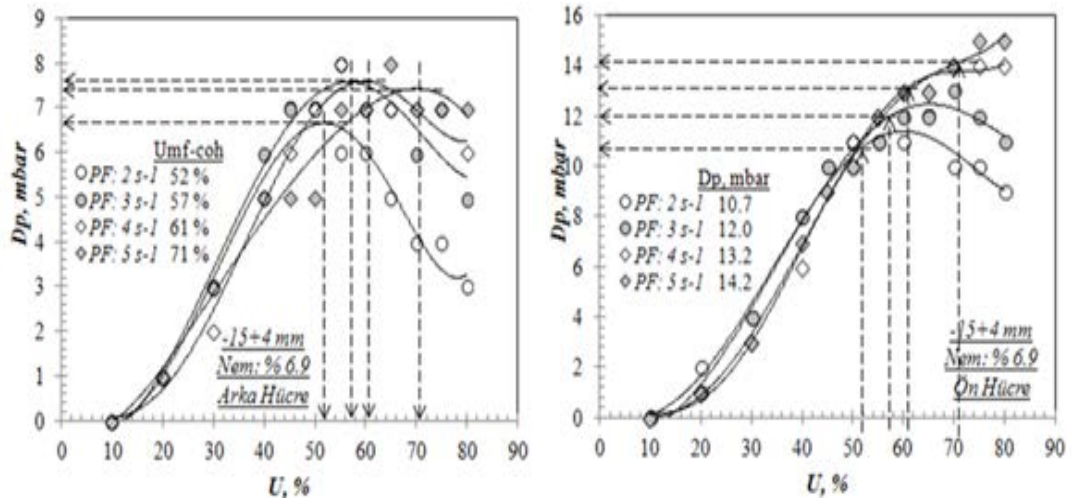
B = Beslenen miktarı, %

b = Beslenen malzeme külü, %

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kömür Besleme Boyutu, Kömür Nemi ve Pülsasyon Frekansının Akışkanlaştırmaya Etkisi

Değişen kömür özelliklerine ve çalışma parametrelerine bağlı olarak akışkanlaştırma karakteristiği eğrileri oluşturulmuş ve akışkanlaştırma karakteristik eğrilerinden (arka hücreden alınan ölçümler dikkate alınmıştır) Umf kohezif (minimum akışkanlaştırma havası) saptanmıştır. İzlenen yol, oluşturulan akışkanlaştırma karakteristiği eğrisi ve Umf kohezif değerlerinin saptanması ile ilgili bir örnek uygulama Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Besleme boyutu, nem ve pülsasyon frekansına bağlı olarak akışkanlaştırma hava hızının belirlenmesi.

Kömür boyutu, nemi ve farklı pülsasyon frekanslarına göre gerçekleştirilen akışkanlaştırma karakteristiği deneyleri sonucunda saptanan Umf kohezif değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelge 4.1’den izlendiği üzere, değişen kömür özellikleri ve pülsasyon frekansına bağlı olarak Umf kohezif değerlerinin değiştiği, değişimde herhangi bir doğrusal eğilim gözlenmediği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Boyut, nem ve farklı pülsasyon frekansına göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.

	NEM (%)	PF	Umf-koh (%)		NEM (%)	PF	Umf-koh (%)		NEM (%)	PF	Umf-koh (%)
Bboyut (-15 mm)	7,5	2	51	Boyut (-15+1 mm)	6,7	2	49	Boyut (-15+4 mm)	6,9	2	52
		3	55			3	53			3	57
		4	52			4	55			4	61
		5	56			5	61			5	75
	11,4	2	47		8,7	2	48		9,4	2	57
		3	55			3	53			3	58
		4	47			4	53			4	62
		5	54			5	58			5	65
	12,5	2	44		13,3	2	51		13,2	2	62
		3	52			3	62			3	62
		4	56			4	60			4	62
		5	58			5	65			5	72
	13,8	2	51		15,5	2	73		14,5	2	62
		3	51			3	60			3	62
		4	59			4	60			4	62
		5	59			5	58			5	59

-15, -15+1 ve -15+4 mm boyut grubunda gerçekleştirilen kuru zenginleştirme sonuçları Çizelge 4.2-4.4'te verilmiştir. Çizelge 4.2'den izleneceği üzere; -15 mm boyut grubunda farklı nem ve pülsasyon genliklerinde yapılan ayırmalar sonucunda; yüzey nemi olmayan %7.5 toplam neme sahip kömür üzerinde en uygun ayırmanın $4s^{-1}$ pülsasyon frekansında gerçekleştiği ve %28.11 kül içerikli lavenin %27.5 ayırma etkinliği ile kazanılabileceği saptanmıştır. Nem oranı arttıkça, en uygun pülsasyon frekansının 2-3 s^{-1} seviyelerinde olduğu ve her ne kadar ayırma etkinliklerinde önemli değişiklikler olmasa da, lave kül içeriklerinin %29-30 seviyelerine yükseldiği gözlemlenmiştir.

-15+1 mm boyut grubunda gerçekleştirilen deney sonuçlarının verildiği Çizelge 4.3 incelendiğinde; kömür nemi arttıkça en uygun pülsasyon frekansının $4s^{-1}$ seviyelerinden 2-3 s^{-1} seviyelerine gerilediği görülmüştür. Kömür nemine bağlı olarak ayırma etkinliklerinin en uygun pülsasyon frekanslarında %6.7-%8.77-%13.3 ve %15.5 kömür nemleri için %21.3, %20.8, %25.1 ve %22.5 olduğu tespit edilmiştir. En uygun lave külleri ise kuru kömür numuneleri ile zenginleştirme sonucunda elde edilmiş ve %25-26 olarak tespit edilmiştir. Kömür nemi arttıkça lave küllerinin %30-34 seviyelerine yükseldiği görülmüştür.

Çizelge 4.2 : -15 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.

	PF s ⁻¹	LAVE		ŞİST		Toplam		YV %	KUV %	AE %
		M, %	K, %	%	%	%	K, %			
-15 mm nem (%7.5)	2	36.9	29.26	63.1	51.29	100.0	43.16	45.9	75.0	20.9
	3	41.8	29.35	58.2	53.06	100.0	43.16	51.9	71.6	23.5
	4	44.8	28.11	55.2	55.39	100.0	43.16	56.7	70.8	27.5
	5	28.7	28.20	71.3	49.17	100.0	43.16	36.2	81.3	17.5
-15 mm nem (%11.4)	2	42.9	28.01	57.1	54.52	100.0	43.16	54.3	72.2	26.5
	3	45.2	29.20	54.8	54.66	100.0	43.16	56.3	69.4	25.7
	4	47.0	29.72	53.0	55.06	100.0	43.16	58.1	67.7	25.7
	5	57.0	32.93	43.0	56.74	100.0	43.16	67.3	56.5	23.8
-15 mm nem (%12.5)	2	46.4	33.11	53.6	51.85	100.0	43.16	54.6	64.4	19.0
	3	47.8	29.83	52.2	55.35	100.0	43.16	59.0	67.0	26.0
	4	48.9	30.32	51.1	55.44	100.0	43.16	59.9	65.7	25.6
	5	48.6	30.20	51.4	55.41	100.0	43.16	59.7	66.0	25.7
-15 mm nem (%13.8)	2	60.2	32.11	39.8	59.86	100.0	43.16	71.9	55.2	27.1
	3	43.6	29.77	56.4	53.52	100.0	43.16	53.9	69.9	23.8
	4	46.7	30.72	53.3	54.05	100.0	43.16	56.9	66.8	23.7
	5	34.8	29.02	65.2	50.71	100.0	43.16	43.5	76.6	20.1

PF: Pülsasyon frekansı, U: Min. Akışk. Hava Hızı, M: Miktar, K: Kül, YV: Yan. Verim, KUV: Kül Uz. Verimi, AE: Ayırma Etk.

Çizelge 4.3 : -15+1 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.

	PF s ⁻¹	LAVE		ŞİST		Toplam		YV %	KUV %	AE %
		M, %	K, %	%	%	%	K, %			
-15+1 mm nem (%6,7)	2	0.3	25.45	99.7	45.55	100.0	45.48	0.5	99.8	0.3
	3	3.9	28.29	96.1	46.18	100.0	45.48	5.1	97.6	2.7
	4	29.2	27.37	70.8	52.96	100.0	45.48	38.9	82.4	21.3
	5	19.5	25.83	80.5	50.24	100.0	45.48	26.5	88.9	15.5
-15+1 mm nem (%8,77)	2	24.6	31.11	75.4	50.16	100.0	45.48	31.0	83.2	14.2
	3	20.8	25.34	79.2	50.77	100.0	45.48	28.5	88.4	16.9
	4	23.3	25.83	76.7	51.44	100.0	45.48	31.7	86.8	18.4
	5	26.8	26.25	73.2	52.51	100.0	45.48	36.2	84.5	20.8
-15+1 mm nem (%13,3)	2	47.6	32.39	52.4	57.35	100.0	45.48	59.0	66.1	25.1
	3	35.2	34.57	64.8	51.41	100.0	45.48	42.3	73.2	15.5
	4	25.6	29.08	74.4	51.12	100.0	45.48	33.3	83.6	16.9
	5	30.1	31.78	69.9	51.37	100.0	45.48	37.6	79.0	16.6
-15+1 mm nem (%15,5)	2	34.5	31.45	65.5	52.87	100.0	45.48	43.4	76.1	19.5
	3	36.6	30.26	63.4	54.27	100.0	45.48	46.8	75.6	22.5
	4	41.2	34.72	58.8	53.02	100.0	45.48	49.3	68.5	17.9
	5	35.2	30.64	64.8	53.54	100.0	45.48	44.8	76.3	21.1

PF: Pülsasyon frekansı, U: Min. Akışk. Hava Hızı, M: Miktar, K: Kül, YV: Yan. Verim, KUV: Kül Uz. Verimi, AE: Ayırma Etk.

Çizelge 4.4 : -15+4 mm boyut grubunda sabitlenen ve optimize edilen diğer şartlarda boyutun ayırmaya etkisinin sonuçları.

	PF s ⁻¹	LAVE		ŞİST		Toplam		YV %	KUV %	AE %
		M, %	K, %	%	%	%	K, %			
-15+4 mm nem (%6,9)	2	32.8	22.35	67.2	51.23	100.0	41.77	43.7	82.5	26.2
	3	46.8	25.24	53.2	56.34	100.0	41.77	60.1	71.7	31.8
	4	44.6	21.41	55.4	58.19	100.0	41.77	60.3	77.1	37.4
	5	39.3	19.57	60.7	56.17	100.0	41.77	54.3	81.6	35.9
-15+4 mm nem (%9,4)	2	33.8	14.86	66.2	55.54	100.0	41.77	49.5	88.0	37.5
	3	49.1	22.60	50.9	60.27	100.0	41.77	65.3	73.4	38.7
	4	52.4	20.49	47.6	65.18	100.0	41.77	71.5	74.3	45.8
	5	61.2	26.31	38.8	66.14	100.0	41.77	77.4	61.5	38.9
-15+4 mm nem (%13,2)	2	51.4	21.42	48.6	63.25	100.0	41.77	69.3	73.7	43.0
	3	38.8	24.95	61.2	52.42	100.0	41.77	50.0	76.8	26.8
	4	33.8	23.43	66.2	51.15	100.0	41.77	44.5	81.0	25.5
	5	40.7	25.97	59.3	52.61	100.0	41.77	51.7	74.7	26.4
-15+4 mm nem (%14,5)	2	52.1	23.97	47.9	61.14	100.0	41.77	68.0	70.1	38.1
	3	33.7	30.12	66.3	47.69	100.0	41.77	40.4	75.7	16.1
	4	54.6	28.33	45.4	57.94	100.0	41.77	67.2	63.0	30.2
	5	52.6	27.95	47.4	57.09	100.0	41.77	65.1	64.8	29.9

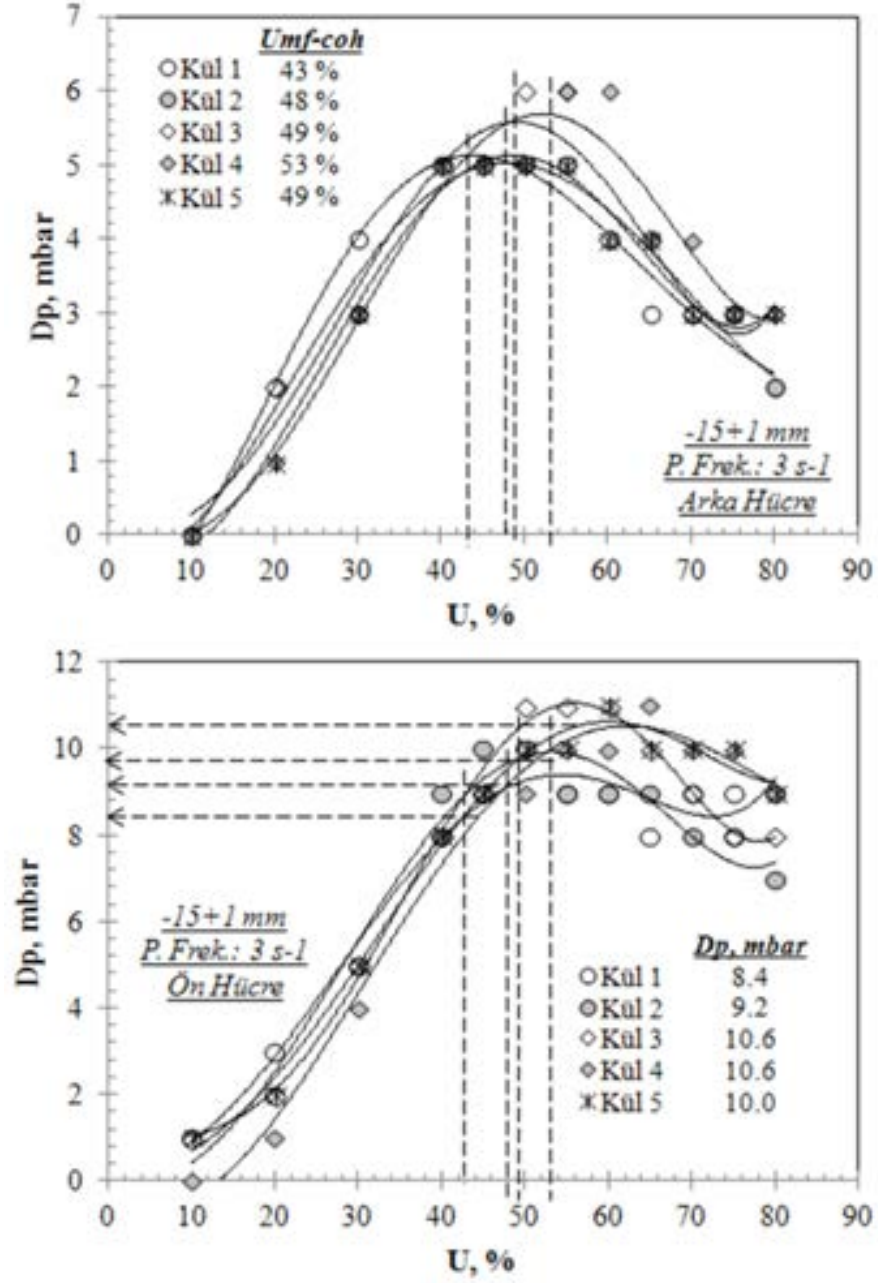
PF: Pülsasyon frekanstı, U: Min. Akışk. Hava Hızı, M: Miktar, K: Kül, YV: Yan. Verim, KUV: Kül Uz. Verimi, AE: Ayırma Etk.

Çizelge 4.4'te sunulan, -15+4 mm boyut grubunda gerçekleştirilen zenginleştirme sonuçları incelendiğinde; diğer boyut gruplarında olduğu gibi etkin pülsasyon genliklerinin nem artışına bağlı olarak 4 s⁻¹ değerlerinden 2 s⁻¹ değerlerine düştüğü saptanmıştır. Kömür nemlerine bağlı olarak bu boyut grubunda yapılan zenginleştirme sonuçları incelendiğinde; kömür neminde belli değerlere kadar olan artışların ayırmaya katkı sağladığı ancak çok yüksek kömür nemlerinde ayırmanın gerilediği tespit edilmiştir. Öyle ki %6.9-%9.4-%13.2 ve %14.5 kömür nemleri için ayırma etkinlikleri sırasıyla %37.4-%45.8-%43.0 ve %38.1 olarak tespit edilmiştir. Lave külleri açısından değerlendirildiğinde %9.4 kömür nemine kadar olan nemlerde yapılan ayırma sonucunda %19-20 küllü laveler mümkün iken, nemin artmasıyla lave kül içeriklerinin %21-23 seviyelerine yükseldiği belirlenmiştir.

4.2 Kömür Besleme Külünün Akışkanlaştırmaya Etkisi

Bu deneysel çalışmalarda beslenen kül içeriği %35-%48 olan besleme malzemesi kullanılmıştır. %35-48 kül içerikli beslenen malzeme hazırlanırken öncelikle bir kuru zenginleştirme işlemi yapılmış ve kuru zenginleştirme sonucu elde edilen şistler kullanılarak farklı kül içeriklerine sahip besleme malzemeleri hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kömür boyutu $-15+1$ mm olarak seçilmiştir. Farklı kül içeriklerine sahip akışkan yatak sisteminin, akışkanlaştırma testleri sonrasında elde edilen Umin-kohezif değerleri Şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Kömür besleme külünün akışkanlaştırmaya etkisi.

Çizelge 4.5’den izleneceği üzere, beslenen kömürün kül içeriği arttıkça, farklı kül içerikli akışkan yatağın uygun akışkanlaştırılması için gerekli olan Umin-kohezif miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu da tamamen akışkan yatağın bulk yoğunluğunun artışıyla ilgilidir.

Çizelge 4.5 : Beslenen kömür kül içeriğine göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.

	Nem (%)	PF (s ⁻¹)	Beslenen Kül İçer. (%)	Umf-koh (%)
Boyut (-15+1 mm)	11.5	3	35.18	45.0
			37.92	47.0
			40.66	48.0
			45.48	53.0
			47.97	48.0

4.3 Beslenen Kömürde -4+1 mm (İnce Malzeme Fraksiyonu) Oranının Akışkanlaştırmaya Etkisi

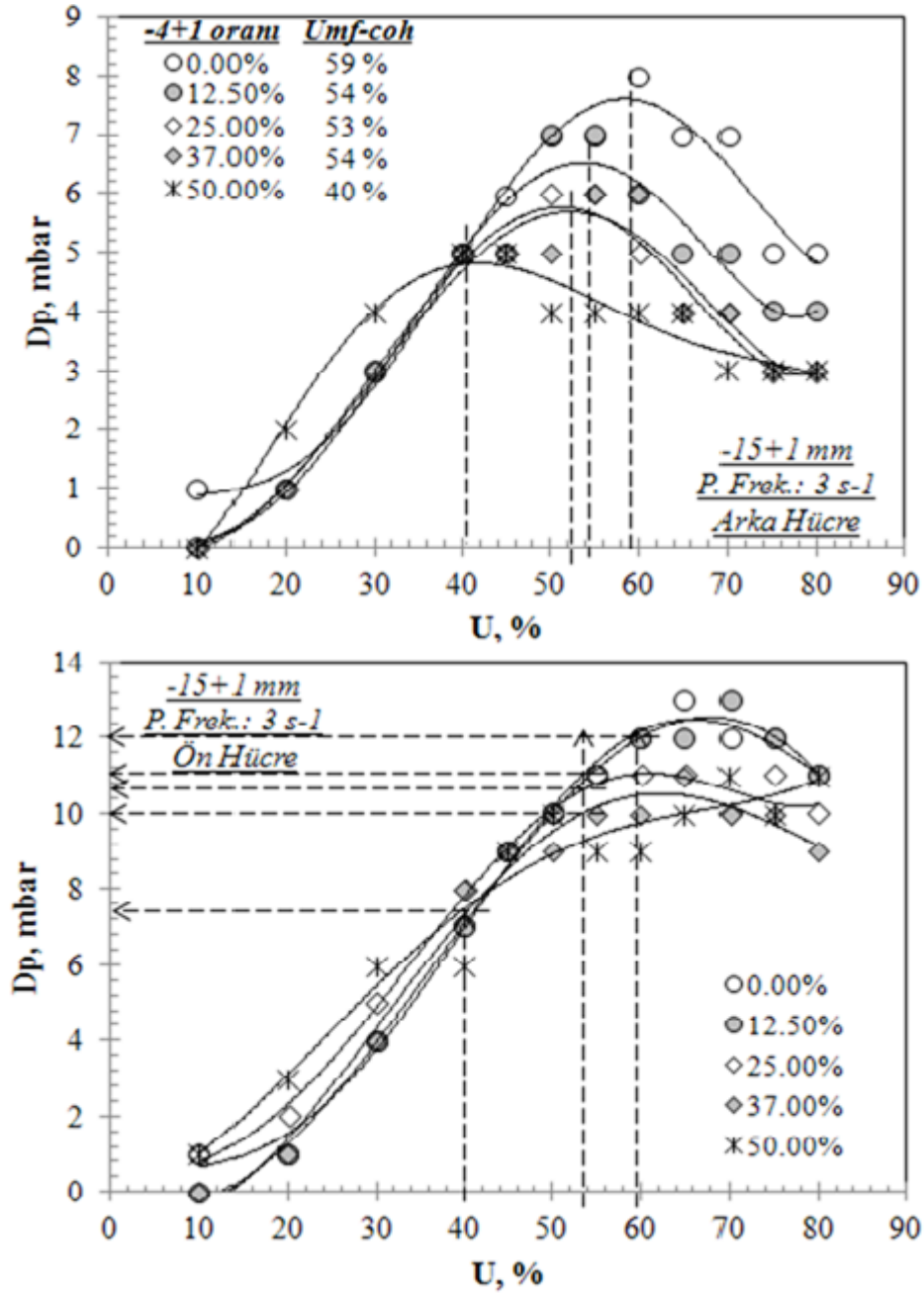
İnce malzeme oranı değişimine bağlı olarak gerçekleştirilen akışkanlaştırma testleri sonucunda elde edilen Umin-kohezif değerleri Çizelge 4.6’de verilmektedir. Geniş boyut dağılımlı kömür numunelerinin tek bir devrede tek bir akışkanlaştırma hava hızında akışkanlaştırılması ve tabakalandırılması zor olmaktadır.

Çizelge 4.6 : Beslenen kömürde -4+1 mm oranı değişimine göre akışkanlaştırma hava hızı sonuçları.

	Nem (%)	PF (s ⁻¹)	Beslenen Kül İçer. (%)	-4+1 mm malzeme oranı (%)	Umf-koh (%)
Boyut (-15+1 mm)	11.5	3	41.77	0.0	53.0
			42.48	12.5	53.0
			43.18	25.0	52.0
			45.48	37.0	53.0
			44.59	50.0	40.0

Bu sebeple ince boyutlu malzeme oranının akışkanlaştırmaya etkisini görmek amacıyla -4+1 mm oranı %0-50 seviyelerinde değişim gösterecek şekilde kömür numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 4.3’te gösterildiği gibi ince malzeme olmadan gerekli olan Umf kohezif değeri %53 iken ince malzeme oranı %50’ye ulaştığında gerekli olan Umf kohezif değeri %40 seviyelerine düşmüştür. Yani ince malzemenin olduğu durumlarda daha düşük akışkanlaştırma hava hızına ihtiyaç duyulmakta ve düşük hava hızları beslenen malzeme içerisinde bulunan iri fraksiyonların daha etkin bir şekilde akışkanlaştırılmasını ve tabakalandırılmasını engellemektedir. Benzer şekilde, iri boyutlu kömürleri akışkan hale getirmek için uygulanan yüksek akışkanlaştırma hava hızı küçük boyutlu tanelerin pnömatik taşınma yolu ile

akışkanlaştırma ve tabakalandırma işlemi olmadan yani ayrılmadan sistemi terketmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.3 : -4+1 mm oranının akışkanlaştırmaya etkisi.

4.4 Akışkanlaştırma Karakteristiklerinde Saptanan Literatürde Yeralmayan Yeni Tanımlamalar

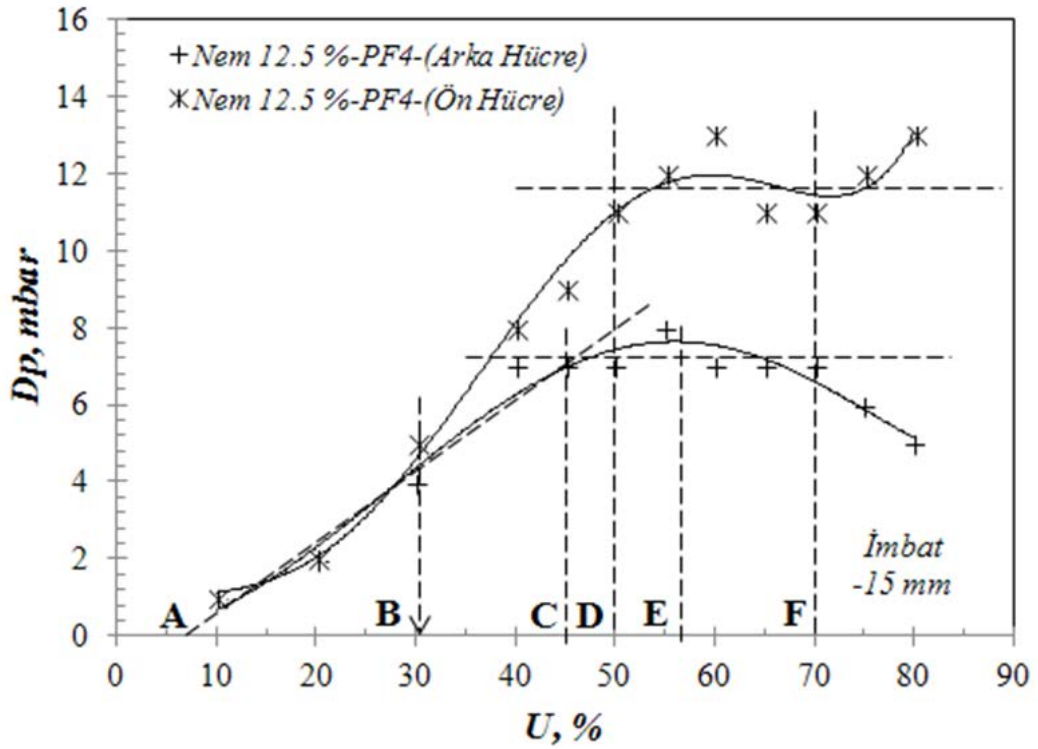
Bugüne kadar yapılan ve literatürde yer verilen akışkanlaştırma testleri genellikle batch sistemlerde gerçekleştirilmiştir. Normal bir akışkanlaştırma ünitesine konulan numune/yatak üzerinde hava hızı değiştirilerek Dp-U ilişkisi gözlemlenmiştir. İlave

olarak akışkan yatağa vibrasyon ya da pülsasyon verilmiş ve bu ilave sistemlerde akışkanlaştırma karakteristiği ölçülmüştür (Boylu ve diğ, 2014). Akışkanlaştırma karakteristiğinin sürekli besleme ve boşaltmanın olduğu ve ilave pülsasyon varlığında yapıldığı tek çalışma Boylu ve diğ. (2014), tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında da, Boylu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada olduğu gibi akışkanlaştırma testleri otojen bir yatakta, sürekli besleme ve boşaltmanın olduğu ilave pülsasyon sistemi varlığında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla literatürde yer almayan, farklı yatak davranışları ve Dp-U ilişkileri belirlenmiştir.

Sürekli besleme ve boşaltmanın olduğu, otojen akışkan yatağın pülsasyon varlığında gözlemlenen akışkanlaştırma karakteristiği Şekil 4.4'de verilmektedir. Eğriler -15+1 mm boyutlu ve %12.5 neme sahip kömürün 4 s^{-1} pülsasyon frekansındaki akışkanlaştırma karakteristiğini ifade etmektedir. Üstteki eğri, tabakalanma işlemi sonrasında batan ve taşanın olduğu jig yatağının ön kısmındaki Dp-U ilişkisini, alttaki eğri ise beslemenin olduğu kısım olan jig eleğinin arka kısmındaki Dp-U ilişkisini göstermektedir. Eğriler polinomial 5 derece eğilimleriyle çizilmiştir. Üstteki eğri tabakalanma, alttaki eğri ise akışkanlaştırma ile ilişkilendirilmektedir.

Normal sistemlerde, eğrinin sabit yatağı temsil ettiği değer orijinden başlamakta olup, bizim uyguladığımız testlerde X eksenini belirli bir değerde kesmektedir (Şekil 4.4-A noktası). Bu değer belirli bir hava hızına kadar herhangi bir Dp değeri ölçülemediğini göstermektedir ki, bu noktaya kadar yatak içerisindeki boşluklardan havanın kolaylıkla geçmesi söz konusudur. B noktası akışkanlaştırma ve tabakalanma bölgesindeki basınç farklarının değişmeden kaldığı en yüksek hava hızı değerini vermektedir. B noktasındaki hava hızlarına kadar jigin ön ve arka kısmında malzeme dizilimi açısından bir fark yoktur. Yani jig ön kısmında bir tabakalanma söz konusu değildir. B noktasından sonra aynı hava hızları için jigin ön ve arka kısmında ölçülen Dp değerlerinde bir fark söz konusu olup, jigin ön kısmında bir tabakalaşmanın başladığı düşünülmektedir.

D noktası; aynı akışkanlaştırma hava hızları için jig ön ve arka kısmında ölçülen basınç farklarının maksimuma ulaştığı noktayı göstermektedir ki en uygun akışkanlaştırma/tabakalandırma ve sonrasında ise ayırmanın bu bölgede olduğu tahmin edilmektedir. C, E, F noktaları klasik akışkanlaştırma eğrilerindeki Umin, Umin-kohezif. ve pnömatik taşınma bölgelerini ifade etmektedir.

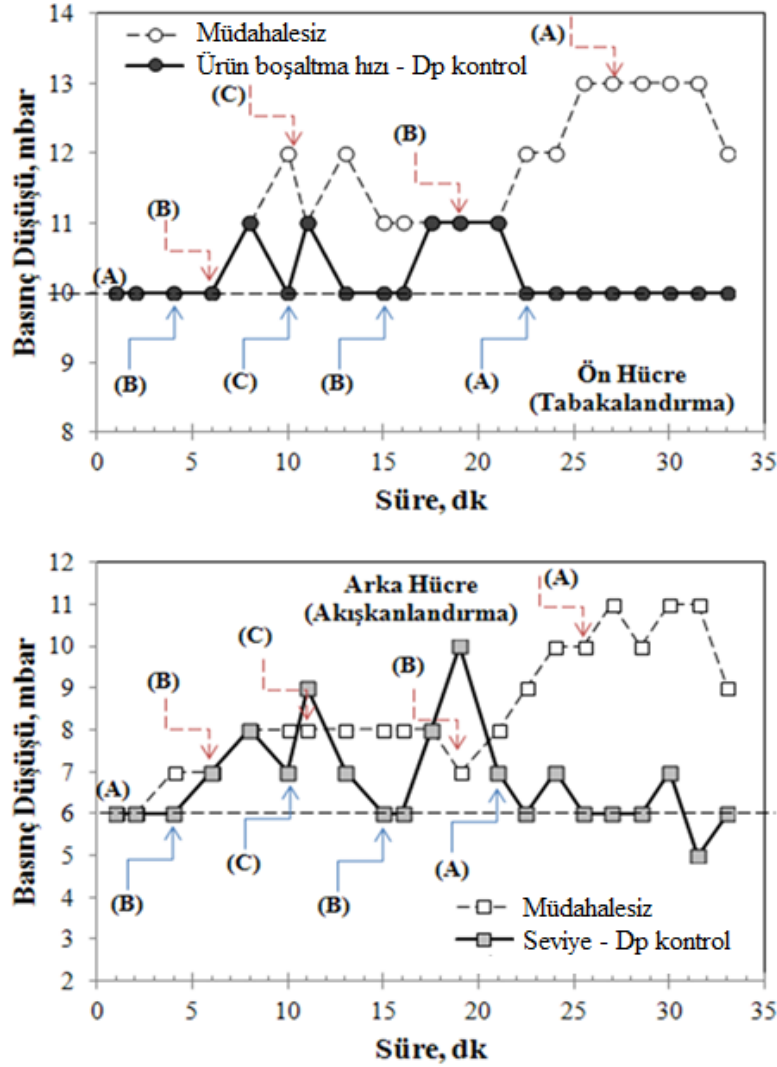


Şekil 4.4 : Sürekli besleme ve boşaltmanın olduğu otojen akışkan yatağın pülsasyon varlığında akışkanlaştırma karakteristiği.

4.5 Δp Kontrollü Ürün Boşaltma Sisteminin Uygulanabilirliğinin Denenmesi

Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanabilirliği için yaklaşık %45 (A), %55 (B) ve %35 (C) küllü beslenen malzeme ürünleri hazırlanmış ve Şekil 4.5’de belirtildiği gibi yaklaşık 25 kg’lık farklı kül içerikli beslemeler sırasıyla yapılarak kuru zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zenginleştirme deneyleri -15+1 mm boyutlu kömür numunesi ve 3 s⁻¹’lik pülsasyon frekansı şartlarında gerçekleştirilmiştir. İlk aşamadaki testlerde kesikli çizgi ile belirtilmiş farklı besleme küllerindeki tüvenan kömürlerin kuru zenginleştirme cihazında ayrılması gözlenmiş ve cihaz şartlarına herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. İkinci aşamadaki testlerde ise düz çizgi ile belirtilmiş Δp değişimleri gözlemlenmiş ve değişimler saptandıktan sonra şist boşaltma hızına müdahale edilerek Δp sabitlenmeye çalışılmıştır. Ürün boşaltma hızlarındaki değişimlerde tabaka yüksekliklerinin sabit tutulması için, ürün boşaltma hızına paralel olarak besleme hızı da değiştirilmiştir. Şist ve besleme hızlarının değişimi el ile ayarlanarak gerçekleştirilmiştir. Testler süresince yaklaşık her iki dakikada bir basınç düşüşü ölçümleri yapılmış ve ayrıca hafif (lave) ve ağır (şist) üründen numuneler alınarak kül testlerine tabii tutulmuştur.

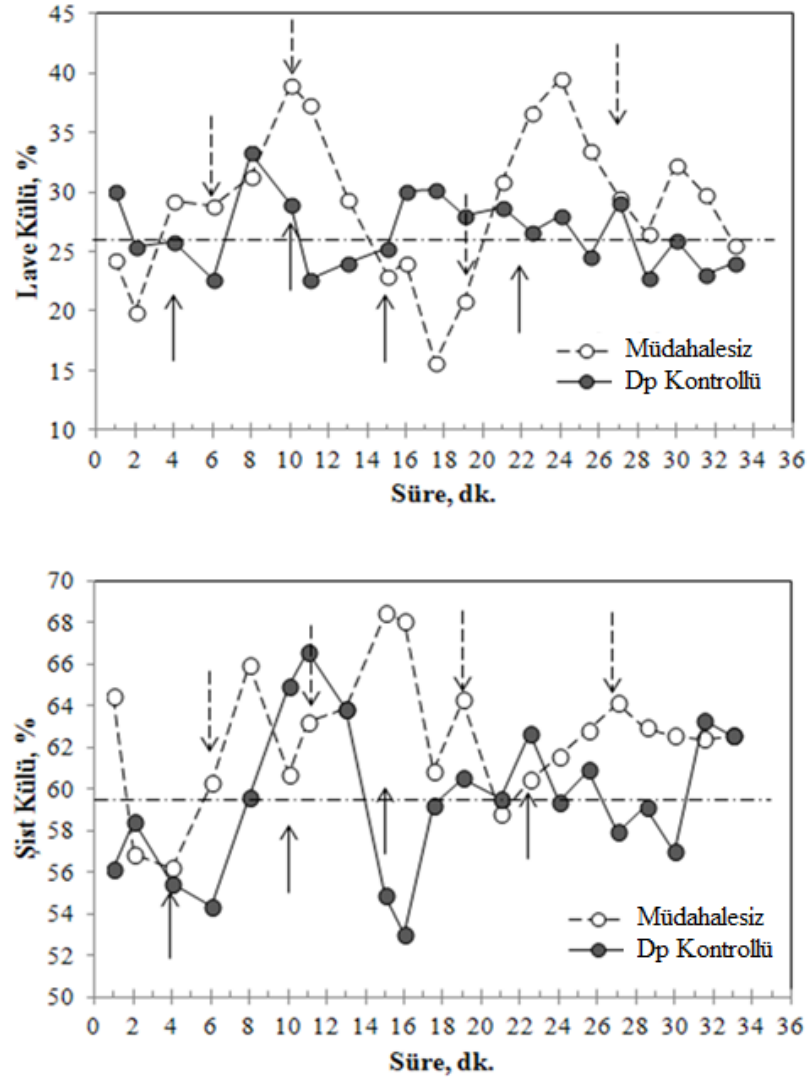
Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma testlerinde ayırma jigi ön ve arka hücresinde ölçülen basınç düşüşleri Şekil 4.5’de, lave ve şist kalitesindeki değişimler ise kül bazında Şekil 4.6’da, kalorifik değer bazında ise Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.5 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma testlerinde ayırma jigi ön ve arka hücresinde ölçülen basınç düşüşleri.

Şekil 4.6 incelendiğinde; tesis besleme tüvenan külü yaklaşık %45 seviyelerinde olduğu durumda optimum ayırma şartlarında havalı jig ön hücrede ölçülen Δp değerlerinin 10 mbar civarında olduğu, müdahale edilmediği durumda değişen beslenen külüne bağlı olarak Δp değerlerinin öncelikle 12 mbar seviyelerine ulaştığı ve sonrasında 13.5 mbar’a kadar ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, akışkanlaştırmanın gerçekleştiği arka hücreden ön hücreye geçişte tabakalanma meydana geldiğini ve lave ve şist tabakasının formunun değiştiğini göstermektedir (kesikli çizgili olan eğri-Şekil 4.6-üst grafik). Bu şartlarda Δp artışı iki nedenden

kaynaklanmaktadır; (a) jig ön hücresinde tabaka yüksekliğinin artması ve (b) şist tabaka kalınlığının artması. Şist tabaka kalınlığının artması belirli oranda şistin hafif ürün olan kömür ile birlikte hareket etmesine neden olması muhtemel olarak düşünülmüştür. Şist tabaka kalınlığının normal seviyelere çekilmesi için şist boşaltma hızı ve tabaka yüksekliğini muhafaza etmek için besleme hızı arttırılmış ve Δp değerleri 10 mbar'a çekilmiştir. Şekil 4.5'den izlendiği gibi ürün boşaltma hızları değiştirilerek jig ön hücresinde Δp sabitlemesi büyük oranda gerçekleştirilmiştir. Beslemenin olduğu ve akışkanlaştırma şartlarının olduğu jigin arka bölümünde ise, ürün boşaltma hızı değişimi ile Δp sabitlenmesi kısmen daha zor olmuştur. Bu durumun akışkanlaştırma şartlarının değişimine neden olabileceği düşünülmüştür.



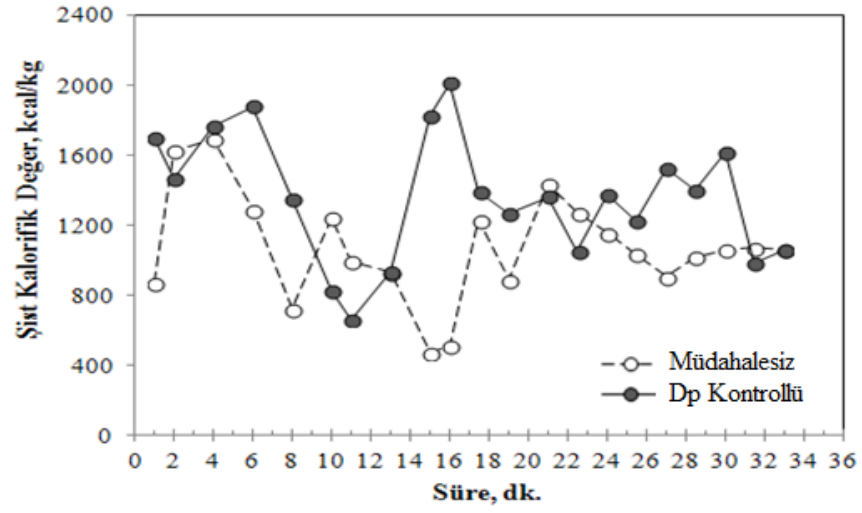
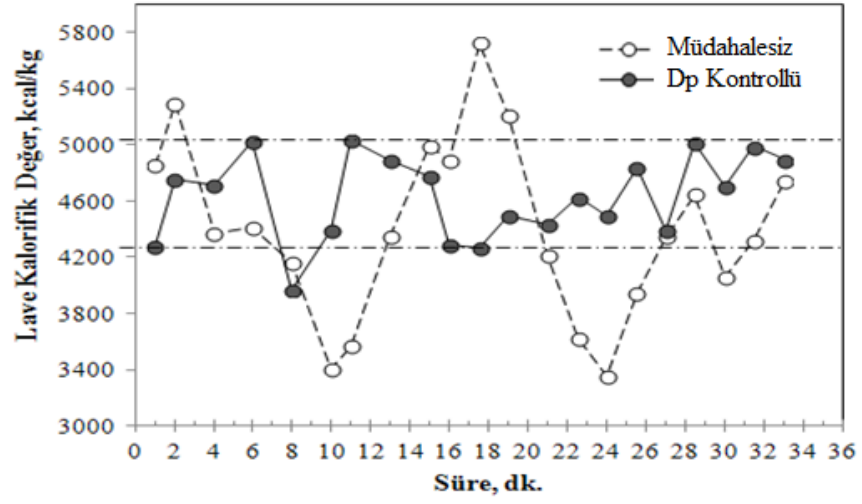
Şekil 4.6 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma testlerinde lave ürünleri kalitesinde kül bazında zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 4.6 incelendiğinde müdahale edilmediği durumlarda, değişen besleme küllerine bağlı olarak lave (temiz kömür) kalitesinde önemli sayılabilecek değişimlerin olduğu saptanmıştır. Öyleki lave külü değişiminin %15-40 arasında olduğu belirlenmiştir. Şist boşaltma hızı ile Δp 'nin sabitlenmesi sağlandığı durumlarda ise lave kalitesi kısmen stabil hale getirilmiş ve lave külü değişiminin %23-33 arasında olduğu saptanmıştır.

Şist kalitesinde kül bazında değişimlerin verildiği Şekil 4.6 incelendiğinde, laveye nazaran şistin gerek müdahalesiz gerekse boşaltma hızı kontrollü sistemlerde büyük dalgalanmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum şist boşaltma hızlarındaki ani değişimler sonucunda boşaltma hızının ani olarak yüksek oranda arttırılmasının jigleme süresini kısıtladığı ve şistin tam tabakalanmadan sistemi terk etmesi ile olabileceği düşünülmüştür. Ancak müdahalesiz durumla karşılaştırıldığında ürün boşaltma hızı değişimi ve Δp kontrolü ile nispeten daha stabil şist ürünü alınabileceği tespit edilmiştir.

Müdahalesiz ve Δp kontrollü ürün boşaltma testleri sonucunda alınan lave ve şist ürünlerinin süreye bağlı olarak kalorifik değer (Alt ısı değer) bazında kalite değişimi ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'den izleneceği üzere, müdahalesiz durumda çok büyük değişimler gösteren lave ve şist kalorifik değerleri kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanması ile daha stabil hale getirilmiştir. Öyleki müdahalesiz gerçekleştirilen testlerde kalorifik değer değişimi 3400-5800 kcal/kg aralığında iken, kontrollü boşaltma ile 4200-5000 kcal/kg aralığına çekilmiştir. Ancak şist kalorifik değerlerinin stabilizasyonu ise laveye nazaran daha zor olmuştur.

Daha önce ifade edildiği üzere; testler %35-%55 küllü farklı beslemelerle (± 10) gerçekleştirilmiştir. Bu değişim oldukça geniş ölçekli bir değişimdir. Tesis şartlarında beslenen kül içeriğindeki değişimlerin en fazla ± 5 gibi oranlarda olacağı düşünülürse, Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanması ile, beslenen külü değişiminden daha az oranda etkilenen ve sürdürülebilir kalitede ürün alımının yüksek ihtimalle başarılabileceği saptanmıştır. Bununla birlikte Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin kontrolü el ile ayarlama sonucu gerçekleştirilmiştir. Yazılım programı ile Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin daha etkin olarak uygulanması da yüksek olasılıkla mümkün olabilecektir.



Şekil 4.7 : Müdahalesiz ve Δp kontrollü ayırma lave ve şist ürünleri kalitesinin kalorifik değer (alt ısı değer) bazında zamana bağlı olarak değişimi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Soma imbat kömürleri numunesinin analiz sonucuna göre, -15 mm boyut grubunda tüvenan kömür külü %43,17 uçucu madde oranı %38,81 sabit karbon oranı %18,02 toplam kükürt miktarı %0,61 yanabilir kükürt oranı %0,58 ve kalorifik değeri 2868 kcal/kg olarak belirlenmiştir. -15+1 mm boyut grubunda tüvenan kömür külü %45,48 uçucu madde oranı %36,33 sabit karbon oranı %18,19 toplam kükürt miktarı %0,58 ve kalorifik değeri 2743 kcal/kg olarak belirlenmiştir. -15+4 mm boyut grubunda tüvenan kömür külü %41,77 uçucu madde oranı %38,30 sabit karbon oranı %19,93 toplam kükürt miktarı %0,49 ve kalorifik değeri 2854 kcal/kg olarak belirlenmiştir.

Her boyut grubu için farklı pülsasyon genliğinde ve farklı nem içeriklerinde akışkanlaştırma karakteristiği belirlenmiştir. Akışkanlaştırma hava hızının nem oranına bağlı olarak değiştiği, nem oranı arttıkça akışkanlaştırma hava hızının da arttığı belirlenmiştir. Ayrıca düşük nemlerde ve yüksek pülsasyon frekansı yüksek olduğunda tabakalanmayı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Akışkanlaştırma karakteristiği belirlenmesinde boyutun etkisi araştırıldığında görülmüştür ki malzeme içinde küçük boyut miktarı arttığında hava hızı düşük olduğunda büyük tanelerin hareketlenmesi ve tabakalanması engellenmekte, hava hızı fazla olduğunda ise ince taneler ayırma işlemine maruz kalmadan pnömatik taşınma ile sistemi terketmektedir.. Dolayısıyla malzeme oldukça dar boyut gruplarına ayrılarak zenginleştirme yapılmasının daha etkili olacağı saptanmıştır.

-15+4 mm boyut grubunda kömür besleme boyutu, kömür nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisinin incelendiği deneyler sonucunda;

Kömür neminin %6,9-%14,5 arasında değiştiği ve en etkin pülsasyon frekanslarında gerçekleştirilen zenginleştirme işlemleri sonucunda (Beslenen kül: %41,77) düşük neme sahip tüvenan kömürlerin kuru zenginleştirilmesinde en yüksek ayırma etkinliklerine ulaşıldığı (%43-46) nem artışına bağlı olarak lave külünün %19-20 seviyelerinden %30 seviyelerine ulaştığı gözlemlenmiştir. En yüksek ayırma etkinliği %9,4 neme sahip tüvenan kömürlerin kuru zenginleştirilmesinde elde edilmiş ve bu

ayırma sonucunda %20,49 kül içerikli bir lave %45,8 ayırma etkinliği ile kazanılmıştır. Atılan şistin kül içeriği ise %65,18 olarak tespit edilmiştir.

Kömür besleme külünün akışkanlaştırmaya etkisinin incelendiği deneyler sonucunda;

Kuru zenginleştirme sonrası elde edilen %35-%48 küllü şistlerin, kömür boyutu -15+1 mm olan gruba besleme malzemesi olarak kullanılan deneyler sonucunda beslenen kömürün kül içeriği arttıkça, farklı kül içerikli akışkan yatağın uygun akışkanlaştırması için gerekli olan Umin-kohezif miktarının %45-%53 arasında artış gösterdiği tespit edilmiştir.

-15 mm boyut grubunda kömür besleme boyutu, kömür nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisinin incelendiği deneyler sonucunda;

Kömür neminin %7,5-% 13,8 arasında değiştiği zenginleştirme işlemleri sonucunda (Beslenen kül: %43,6) hemen hemen benzer ayırma etkinliklerine ulaşıldığı, ancak lave kalitesinin kömür nemine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir (%28-29 seviyelerinden %30-33 seviyelerine). En yüksek ayırma etkinliği % 7,5 neme sahip (yüzey nemi çok düşük) tüvenan kömürlerin kuru zenginleştirilmesinde elde edilmiş ve bu ayırma sonucunda %28,11 kül içerikli bir lave % 27,5 ayırma etkinliği ile kazanılmıştır. Atılan şistin kül içeriği ise %55,2 olarak tespit edilmiştir.

-15+1 mm boyut grubunda kömür besleme boyutu, kömür nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisinin incelendiği deneyler sonucunda;

Kömür neminin % 6,7-% 15,5 arasında değiştiği ve en etkin pülsasyon frekanslarında gerçekleştirilen zenginleştirme işlemleri sonucunda (Beslenen kül: % 45,48) hemen hemen benzer ayırma etkinliklerine ulaşıldığı (%21-25), ancak lave kalitesinin kömür nemine bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir (%25 seviyelerinden %35 seviyelerine). En yüksek ayırma etkinliği %6,7 neme sahip (yüzey nemi çok düşük) tüvenan kömürlerin kuru zenginleştirilmesinde elde edilmiş ve bu ayırma sonucunda %27,37 kül içerikli bir lave %21,3 ayırma etkinliği ile kazanılmıştır. Atılan şistin kül içeriği ise %52,96 olarak tespit edilmiştir.

Beslenen kömürde -4+1 mm (ince malzeme fraksiyonu) oranının akışkanlaştırmaya etkisinin incelendiği deneyler sonucunda;

-4+1 mm ince malzeme olmadan gerekli olan Umf kohezif değeri %53 iken ince malzeme oranı %50'ye ulaştığında gerekli olan Umf kohezif değerinin %40 seviyelerine düştüğü tespit edilmiştir. İnce malzemenin olduğu durumlarda daha düşük akışkanlandırma hava hızına ihtiyaç duyulduğu ve düşük hava hızlarının, beslenen malzeme içerisinde bulunan iri fraksiyonların daha etkin bir şekilde akışkanlandırılmasını ve tabakalandırılmasını engellediği belirlenmiştir. İnce malzeme oranı artıkça ayırma işleminin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, iri boyutlu kömürleri akışkan hale getirmek için uygulanan yüksek akışkanlandırma hava hızının, küçük boyutlu tanelerin pnömatik taşınma yolu ile akışkanlandırma/tabakalandırma işlemi olmadan yani ayrılmadan sistemi terketmesine neden olduğu saptanmıştır.

Akışkanlaştırma karakteristiklerinde saptanan literatürde yeralmayan yeni tanımlamalar;

Bu çalışma ile daha önce uygulaması olmayan, sürekli besleme ve boşaltmanın olduğu sistemlerde akışkanlandırma-tabakalandırma uygulaması araştırılmış ve klasik, akışkanlaştırma deyimlerine yeni tanımlamalar getirilmiştir; Akışkanlandırma-tabakalanma geçiş bölgesi, Tane hareket başlangıcı için gerekli olan hava miktarı vs.

Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanabilirliğinin denenmesinin incelendiği deneyler sonucunda;

Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanabilirliği için yaklaşık %45 (A), %55 (B) ve %35 (C) küllü beslenen malzeme ürünleri hazırlanmış, Zenginleştirme deneyleri -15+1 mm boyutlu kömür numunesi ve 3 s⁻¹'lik pulsasyon frekansı şartlarında yaklaşık 25 kg'lık farklı kül içerikli beslemeler sırasıyla yapılarak kuru zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tesis besleme tüvenan külü yaklaşık %45 seviyelerinde olduğu durumda optimum ayırma şartlarında havalı jig ön hücrede ölçülen Δp değerlerinin 10 mbar civarında olduğu, müdahale edilmediği durumda değişen beslenen küllüne bağlı olarak Δp değerlerinin öncelikle 12 mbar seviyelerine ulaştığı ve sonrasında 13.5 mbar'a kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Değişen besleme küllerine bağlı olarak lave kalitesinde önemli sayılabilecek

değişimlerin olduğu saptanmıştır. Lave külü değişiminin %15-40 arasında olduğu belirlenmiştir. Şist boşaltma hızı ile Δp 'nin sabitlenmesi sağlandığı durumlarda ise lave kalitesi kısmen stabil hale getirilmiş ve lave külü değişiminin %23-33 arasında olduğu tespit edilmiştir. Şist kalitesinde laveye nazaran şistin gerek müdahalesiz gerekse boşaltma hızı kontrollü sistemlerde büyük dalgalanmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak müdahalesiz durumla karşılaştırıldığında ürün boşaltma hızı değişimi ve Δp kontrolü ile nispeten daha stabil şist ürünü alınabileceği tespit edilmiştir. Müdahalesiz durumda çok büyük değişimler gösteren lave ve şist kalorifik değerleri kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanması ile daha stabil hale getirilmiştir. Öyleki müdahalesiz gerçekleştirilen testlerde kalorifik değer değişimi 3400-5800 kcal/kg aralığında iken, kontrollü boşaltma ile 4200-5000 kcal/kg aralığına çekildiği saptanmıştır. Ancak şist kalorifik değerlerinin stabilizasyonu ise laveye nazaran daha zor olmuştur. Deneylerde kullanılan geniş ölçekli kül miktarının (%35-%55), tesis şartlarında daha dar bir değişim aralığında olacağı (± 5) düşünüldüğünde Δp kontrollü ürün boşaltma sisteminin uygulanması ile, beslenen külü değişiminden daha az oranda etkilenen ve sürdürülebilir kalitede ürün alımının yüksek ihtimalle başaranılabileceği saptanmıştır.

Sonuç olarak;

Kuru zenginleştirme işlemi ayırma ortamı olarak havanın kullanıldığı akışkan yataklı ayırma sistemleridir. Bu sistemlerde değişen kömür ve cihaz parametrelerine bağlı olarak akışkanlaştırma karakteristiğinin saptanması ve akışkanlaştırma hava hızının buradan elde edilecek verilerle hesaplanması ve uygulaması gerekmektedir. Akışkanlaştırma hava hızı değişken şartlara göre ayarlandığında, kömür ve cihaz parametrelerinin olumsuz etkilerinin daha düşük seviyelere getirilebileceği bu tez çalışması sonucunda anlaşılmıştır.

Akışkanlaştırma karakteristiği, ayırma performansı ilişkileri, akışkanlaştırma karakteristiğinin dikkatli uygulanması ile kontrollü bir ürün boşaltma sisteminin de mümkün olduğu bu çalışmalar sonucunda belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ateşok, G. (2009). Kömür Hazırlama ve Teknolojisi. *Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayını*, İstanbul, Türkiye.
- Boylu, F., Tasdemiroglu E. V., Karağaçlıoğlu I. E., Çetinel T. ve Çinku K. (2012). Dry Processing of Leonardite by Air Based Gravity Separators. *International Mineral Processing Symposium Preceedings Book*.
- Boylu, F., Talı, E., Çetinel, T., Çelik, M.S. (2014). Effect of fluidizing characteristics on upgrading of lignitic coals in gravity based air jig, *International Journal of Mineral Processing*, 129, 27-35.
- Chen, Q. ve Yang, Y. (2003). Development of Dry Beneficiation of Coal in China. *Coal Preparation* 23, 3 -12.
- Çelik, M.S. And YILDIRIM, I. (2000). A New Physical Process for Desulfurization of Low-Rank Coals, Fuel.
- Donnelly, J. (1999). Potential Revival of dry Cleaning of Coal. *The Australian Coal Review*.
- Dwari, R. K. ve Rao, H. K. (2007). Dry Beneficiation of Coal- A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 28, 177-234.
- ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı) (2012). 2010 Yılı Genel Enerji Dengesi.
- ETKB/EİGM (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı / Enerji İşleri Genel Müdürlüğü) (2011). Kömür Rezervlerinin Güncellenmesi Çalışması – Rapor 2 Eylül 2011.
- Fan, M., Luo, Z., Tao, D., Zhao, Y. ve Chen, Q. (2009). Dry Coal Separation with a Vibrated Air-Dense Medium Fluidized Bed, *SME Annual Meeting* (Sf. 1-4). Preprint 09-112, February 22-25.
- Ferreira Feil, N., Hoffmann Sampaio, C. ve Wotruba, H. (2012). Influence of jig frequency on the separation of coal from the Bonito seam. *Fuel Processing Technology* 96, (Sf. 22–26). Santa Catarina, Brazil, 2012.
- Honaker, R. Q. (2007). Coarse Dry Coal Cleaning. *Workshop on Coal Beneficiation and Utilization of Rejects : Initiatives, Policies and Best Practices*, Ranchi, India.
- Kemal, M. (1991). Linyit Kömürü Değerlendirilmesi ve Kullanımında Kömür Özelliklerinin Etkileri, Önal, G., Ateşok, G., Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri, *Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayını*, İstanbul.
- Kretschmar, S. (2010). *Dry beneficiation of coal using an air dense-medium Fluidised bed separator*, (master tezi), in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of KwaZulu-Natal.

- Luo Z., Fan M., Zhao Y., Tao X., Chen Q. ve Chen Z.** (2008). Density-dependent separation of dry fine coal in a vibrated fluidized bed. *Powder Technology*, 187, 119–123.
- Luo, Z., Zhu, J., Fan, M., Zhao, Y. ve Tao, X.** (2007). Low Density Dry Coal Beneficiation Using an Air Dense Medium Fluidized Bed. *Journal of China University of Mining and Technology* (Vol. 17, 3, Sf. 306-309).
- Mohanta, S., Rao, C.S., Daram, A.B., Chakraborty, S. and Meika, B.C.** (2013). Air Dense Medium Fluidized Bed for Dry Beneficiation of Coal: Technological Challenges for Future. *Particulate Science and Technology*, 31, 16–27.
- Patil, D.P. ve Parekh, B.K.** (2011). Beneficiation of Fine Coal Using the Air Table. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 203–222.
- Sampaio, C. H., Alaga, W., Pacheco, E. T., Petter, E. Ve Wotruba, H.** (2008). Coal beneficiation of Candiota mine by dry jigging, *Fuel Processing Technology*.
- Schobert, H.** (1987). Coal: The Energy Source of the Past and Future. *American chemical Society*, Washington, USA.
- Snoby, R., Thompson, K., Mishra, S. Ve Snoby, B.** (2009). Dry Jigging Coal: Case History Performance. *SME Annual Meeting*, Denver.
- Soong, Y., Link, T. A., Schoffstall, M.R., Gray, M. L., Fauth, D. J., Knoer, J. P., Jones, J. R., Ve Gamwo, I. K.** (2001). Dry beneficiation of Slovakian coal. *Fuel Processing Technology*, 72, 3, 185-198.
- Tao, D., Sobhy, A., Li, Q., Honaker, R. ve Zhao, Y.** (2011). Dry Cleaning of Pulverized Coal Using a Novel Rotary Triboelectrostatic Separator (RTS), *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 187-202.
- TKİ** (Türkiye Kömür İşletmeleri) (2011). Kömür Sektör Raporu.
- TTK** (Türkiye Taşkömürü Kurumu) (2012). Taşkömürü Sektör Raporu 2011. Mart 2012. (Sf. 24-25).
- Turki, D., ve Fatah, N.** (2008). Fluid dynamics; heat and mass transfer; and other topics, Behavior and fluidization of the cohesive powders: agglomerates sizes approach. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* (Vol.25, No.4). São Paulo, Ekim-Aralık 2008.
- Ward, C. R.** (1984). Coal Geology and Coal Technology. *Blackwell Scientific Publications*, London, United Kingdom.
- Weitkaemper, L. ve Wotruba H.** (2010). Effective Dry Density Beneficiation of Coal. XXV *International Mineral Processing Congress (IMPC)* 2010, Proceedings, September.
- Wotruba, H., Weitkaemper L., Steinberg M.** (2010). Development of A New Dry Density Separator For Fine-Grained Materials. XXV *International Mineral Processing Congress (IMPC)* 2010, Proceedings, September.
- Zhang, H., Akbari F., Yang, M.K. and Mohanty, J.** (2011). Performance Optimization of the FGX Dry Separator for Cleaning High- Sulfur

Coal, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 3-4, 161-186.

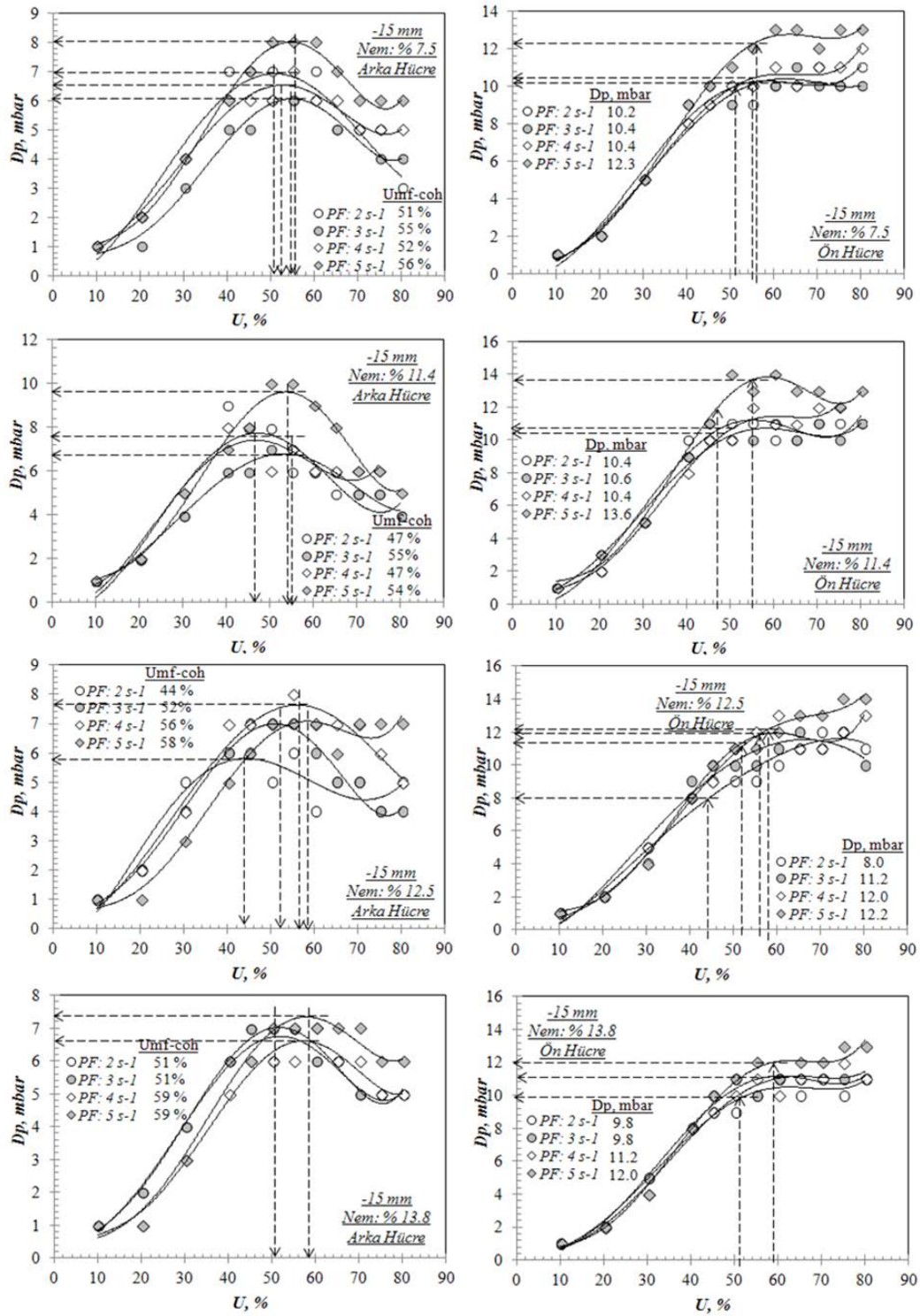
Zhao, Y. M., Liu, X. J., Liu, K. L., Luo, Z.F., Wu, W.C., Song, S.L. ve Tang, L. G. (2011). Fluidization Characteristics of a Gas-Paigeite-Powder Bed to be Utilized for Dry Coal Beneficiation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 149-160.

Zhen-Fu L., Jian-feng Z., Mao-ming F., Yue-min Z. ve Xiu-xiang, T. (2007). Low Density Dry Coal Beneficiation Using an Air Dense Meidum Fluidized Bed. *Journal of China University of Mining & Technology*, 17, 3, 306-309.

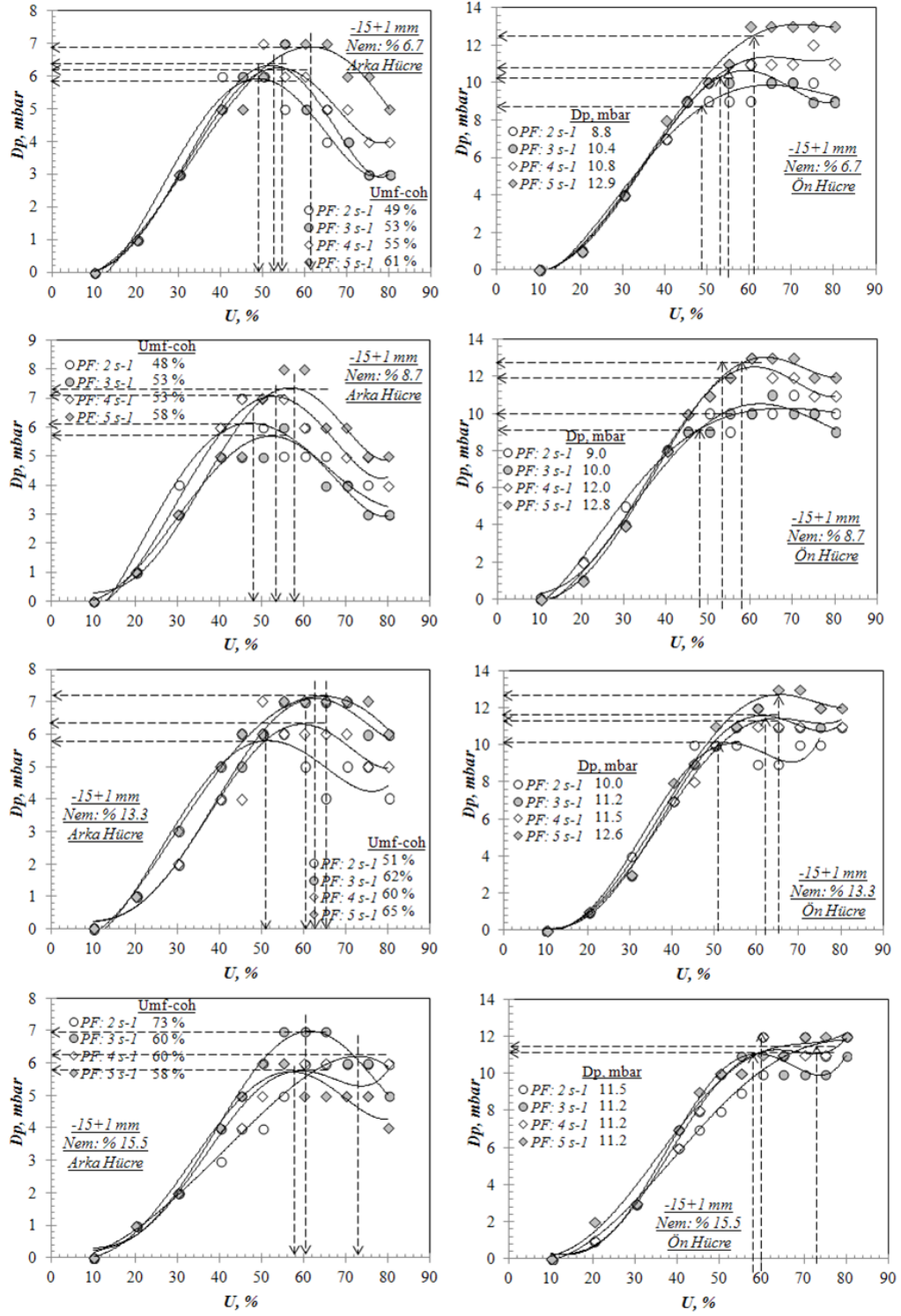
EKLER

EK A: Kömür besleme boyutu, nemi ve pülsasyon frekansının akışkanlandırmaya etkisini gösteren şekiller.

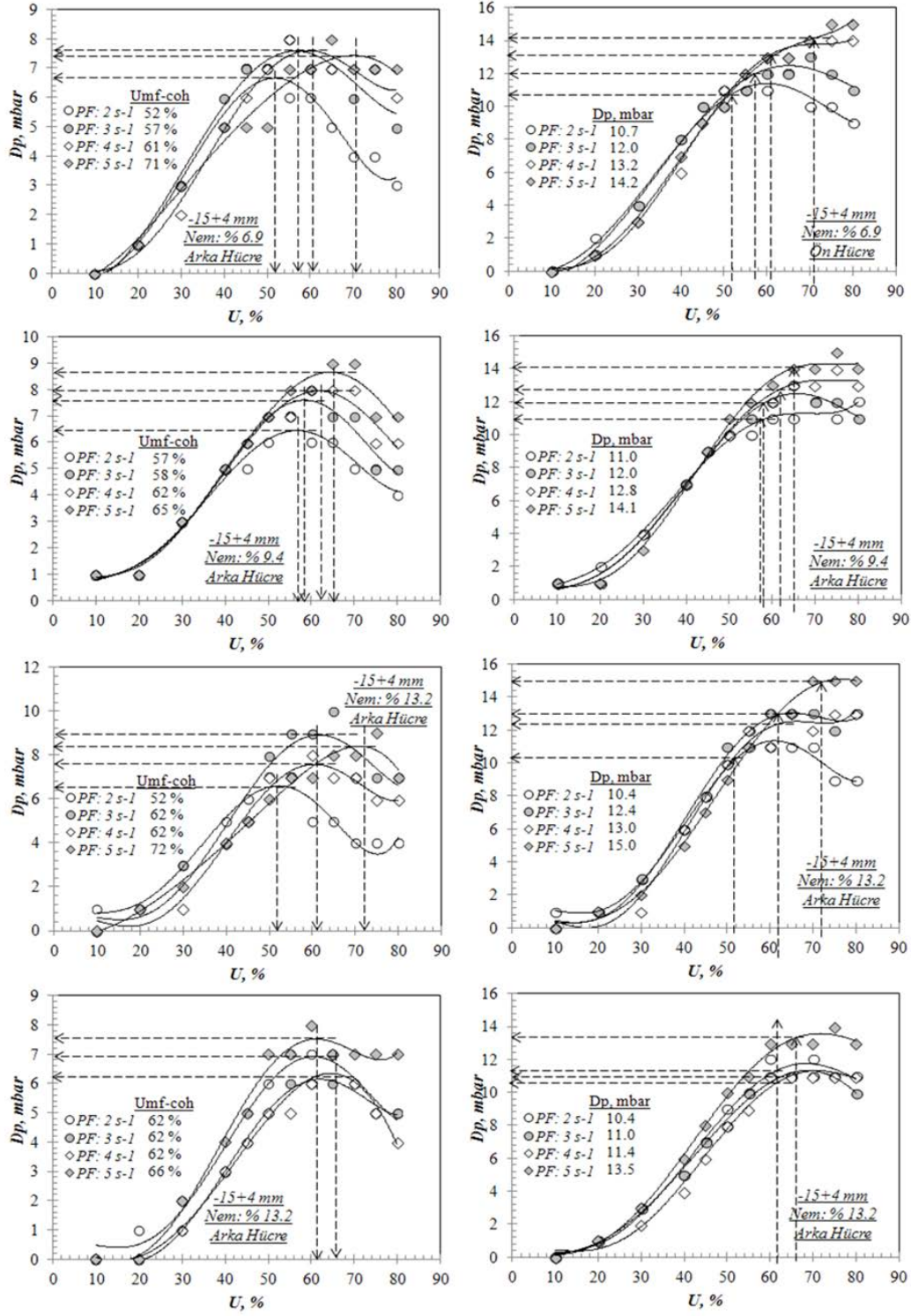
EK A



Şekil A.1 : -15 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pulsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisi.



Şekil A.2 : -15+1 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pulsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisi.



Şekil A.3 : -15+4 mm kömür besleme boyutu, nemi ve pulsasyon frekansının akışkanlaştırmaya etkisi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad :Ufuk AYKAÇ
Doğum Yeri ve Tarihi :Şişli, 1985
E-Posta :ufukaykac@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** :2010, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

