

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TUNÇBİLEK LAVVARI İNCE ATIKLARINDAN YAĞ AGLOMERASYONU  
YÖNTEMİYLE KÖMÜR KAZANIMI**

**DOKTORA TEZİ**

**Maden Yüksek Mühendisi Özüm YAŞAR**

**ARALIK 2018  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalında  
Özüm YAŞAR Tarafından Hazırlanan**

**TUNÇBİLEK LAVVARI İNCE ATIKLARINDAN YAĞ AGLOMERASYONU  
YÖNTEMİYLE KÖMÜR KAZANIMI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 20 /11 /2018 gün ve 1779 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. N. Emre ALTUN**

**Üye : Prof. Dr. Tuncay USLU**

**Üye : Prof. Dr. İbrahim ALP**

**Üye : Prof. Dr. Celal DURAN**

**Üye : Doç. Dr. Gülşen TOZSİN**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Tunçbilek lavvarı ince atıklarından yağ aglomerasyonu yöntemiyle kömür kazanımı” isimli bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Bu doktora çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından 9661 kodlu Temel Araştırma Projesi (BAP01) ile desteklenmiştir, bu desteğinden dolayı BAP Birimi’ne teşekkürlerimi bildiririm. Doktora tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren ve her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Tuncay USLU’ya teşekkür ederim. Doktora tezinin izlenmesi aşamasındaki katkıları ve yönlendirmelerinden dolayı tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. İbrahim ALP ve Prof. Dr. Celal DURAN’a teşekkürlerimi sunarım. Tunçbilek lavvar atıklarının temin edilmesindeki izin ve yardımlarından dolayı Türkiye Kömür İşletmeleri’ne ve Maden Mühendisi Gözde ÇOŞKUN’a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar sırasında elementel analiz cihazının kullanılmasını sağlayan ve analizler boyunca sabrı ve hoşgörüsüyle desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet MISIR’a teşekkür ederim. XRD ve SEM analizlerindeki yardımlarından dolayı Öğr. Gör. Dr. Fatih ÖZKALAYCI’ya, Arş. Gör. Kürşat İÇİN’e ve Arş. Gör. Abdullah Hasan KARABACAK’a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalardaki yardımlarından dolayı Orçun TOLUNAY’a teşekkür ederim. Doktora tez çalışmalarım boyunca yardımları ve destekleri için Doç. Dr. Tuğba TÜRK, Arş. Gör. Melek Hanım BEŞER, Arş. Gör. Elif YILMAZ ve diğer bütün çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında yoluma ışık tutan ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim. Son olarak, doktora tezimin bütün aşamalarında çok büyük bir fedakarlıkla yanımda olan, bakış açısıyla her türlü zorluğu kolaylaştıran sevgili eşim Serdar YAŞAR’a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Özüm YAŞAR

Trabzon 2018

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Doktora tezi olarak sunduğum ‘‘Tunçbilek lavvarı ince atıklarından yağ aglomerasyonu yöntemiyle kömür kazanımı’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tuncay USLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10 / 12 / 2018.

**zm YAŞAR**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Kömürün Tanımı, Oluşumu ve Sınıflandırılması .....	3
1.3. Kömürün Önemi, Rezervleri, Üretimi ve Tüketimi .....	6
1.4. Kömür Temizlemenin Önemi ve Gerekçeleri .....	10
1.5. İnce Kömür Oluşum Sebepleri, Kayıpları ve Geri Kazanım Gerekliliği .....	13
1.6. Kömür Temizleme Yöntemleri .....	15
1.7. İnce Kömür Temizleme Yöntemleri.....	17
1.7.1. Su Siklonları .....	17
1.7.2. Geliştirilmiş (Santrifüjlü) Gravite Ayırıcıları.....	19
1.7.2.1. Falkon Konsantratörü .....	19
1.7.2.2. Kelsey Jigi .....	21
1.7.2.3. Knelson Konsantratörü.....	22
1.7.2.4. Mozley Multi Gravite Ayırıcısı (MGS).....	23
1.7.3. Flotasyon .....	24
1.7.3.1. Kolon Flotasyonu .....	27
1.7.4. Flokülasyon .....	29
1.7.5. Yağ Aglomerasyonu.....	31
1.7.5.1. Yağ Aglomerasyonunun Teorisi .....	32
1.7.5.2. Yağ Aglomerasyonuna Etki Eden Faktörler .....	37
1.7.5.3. Yağ Aglomerasyonu Yönteminin Tarihçesi.....	41
1.8. Tunçbilek Lavvarı ve Şlam Atıkları.....	44

1.9.	Lavvar Atıklarından Kömür Kazanımına Dair Yapılan Çalışmalar.....	48
1.10.	Lavvar Atıklarından Aglomerasyon Yöntemi ile Kömür Kazanımına Dair Yapılmış Çalışmalar .....	51
1.11.	Çalışmanın Özgün Değeri .....	52
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	54
2.1.	Örnek Temini .....	55
2.2.	Örneğin Hazırlanması ve Karakterizasyonu.....	55
2.3.	Atık Bitkisel Yağın Özellikleri.....	61
2.4.	Aglomerasyon Deneylerinin Yapılışı.....	62
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	67
3.1.	Şıamlı Atıkların Aglomerasyonu.....	67
3.1.1.	Katı Oranı ve Yağ Dozajının Etkisi .....	67
3.1.2.	Dağıtıcıların Aglomerasyona Etkisi .....	68
3.2.	Şıamsız Atıkların Aglomerasyonu .....	70
3.2.1.	Katı Oranının Aglomerasyona Etkisi .....	70
3.2.2.	Yağ Dozajının Aglomerasyona Etkisi .....	71
3.2.3.	Yağ Cinsinin Aglomerasyona Etkisi .....	74
3.2.4.	Karıştırma Hızının Aglomerasyona Etkisi .....	75
3.2.5.	Karıştırma Süresinin Aglomerasyona Etkisi .....	76
3.2.6.	Tane Boyutu ve Elek Boyutunun Aglomerasyona Etkisi.....	77
3.2.7.	Yıkama Suyu Miktarının Aglomerasyona Etkisi .....	85
3.2.8.	Ortam pH'ının Aglomerasyona Etkisi.....	85
3.2.9.	Tuzların Aglomerasyona Etkisi.....	91
3.2.10.	Süfaktantların Aglomerasyona Etkisi .....	99
3.2.11.	Flotasyon ile Aglomerat Kazanımı.....	101
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	111
5.	KAYNAKLAR.....	113
6.	EKLER .....	126

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

TUNÇBİLEK LAVVARI İNCE ATIKLARINDAN YAĞ AGLOMERASYONU  
YÖNTEMİYLE KÖMÜR KAZANIMI

Özüm YAŞAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Tuncay USLU  
2018, 125 Sayfa, 17 Sayfa Ek

Petrol ve doğalgaz rezervleri yok denecek kadar az olan ülkemizin sahip olduğu en önemli yerel kaynak kömürdür. Kömür rezervlerimizin büyük bölümünü kalitesi düşük linyitler oluşturmaktadır. Bu sebeple linyitlerimizin birçoğu lavvarlarda temizlenerek kaliteleri artırılmaktadır. Lavvarlarda, kömürün ince fraksiyonu (-500 µm) etkin bir şekilde temizlenememekte ve atık barajlarına gönderilmektedir. Bu durum, önemli bir enerji kaynağı olan kömürün kaybedilmesine yol açtığı gibi çevresel kirliliğe de sebep olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Türkiye'deki lavvarlardan biri olan Tunçbilek lavvarı ince boyutlu atıklarından, atık yağın bağlayıcı olarak kullanıldığı yağ aglomerasyonu yöntemiyle kömürün kazanılması amaçlanmıştır. Çok sayıda parametre aglomerasyon işleminde değişken olarak incelenmiş, çeşitli tuzların ve sürfaktantların performans üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca aglomerat kazanım yöntemi olarak eleme yerine flotasyon da kullanılarak her iki yöntemin performansı karşılaştırılmıştır.

Şlam uzaklaştırma yapılmadan atıklardan başarılı bir şekilde kömür kazanılamadığı anlaşılmış, şlamı atılmış atıklardan %31,8 kül içerikli kömür %47,6 organik malzeme verimi ile kazanılmıştır. Tuzlar kullanıldığında %30,8 kül içerikli kömür elde edilmiş, organik malzeme verimi %63,9'a yükselmiştir. Sürfaktantlar kullanıldığında daha küllü kömür (%41) %63 organik malzeme verimiyle kazanılmıştır. En başarılı sonuç aglomerat kazanımında elekler yerine flotasyon kullanıldığında elde edilmiş, %30,5 küllü temiz kömür %92 organik malzeme verimi ile kazanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kömür, kömür temizleme, ince kömür atıkları, yağ aglomerasyonu, atık bitkisel yağ

PhD. Thesis

SUMMARY

RECOVERY OF COAL FROM FINE TAILINGS OF TUNÇBİLEK COAL WASHERY  
BY OIL AGGLOMERATION

Özüm YAŞAR

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Tuncay USLU  
2018, 125 Pages, 17 Pages Appendices

Coal is the most important domestic energy source of Turkey due to limited reserves of oil and natural gas. However, coal reserves mainly comprise low quality lignites. Therefore, quality of these lignites is increased in coal washeries. Fine fraction ( $-500\ \mu\text{m}$ ) of coal in washeries can not be cleaned efficiently and disposed to tailings ponds. This situation causes loss of a valuable energy sources as well as environmental pollution.

In the present study, recovery of coals from fine tailings of Tunçbilek coal washery of Turkey by waste oil using agglomeration was investigated. Several parameters were investigated as variables in agglomeration process. Effects of various salts and surfactants on the performance were determined. In addition, flotation was comparatively used instead of sieving in agglomerate recovery stage.

It was found that considerable coal recovery from the tailings could not be performed without desliming. After desliming, a clean coal with 31,8% was recovered by 47,6% organic matter recovery. When the salts and surfactants were used, clean coals with 30,8% and 40,8% were obtained by organic matter recovery of 63,9% and 63,4%, respectively. Using of flotation instead of sieving produced most satisfying results in which a clean coal with 30,5% ash was recovered by 92% organic matter recovery.

**Keywords:** Coal, coal processing, fine coal tailings, oil agglomeration, waste vegetable oil.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tunçbilek lavvar tesisi atık sahası .....	2
Şekil 1.2. Kömürün oluşumu ve kömürleşme derecesi (URL-1, 2018).....	4
Şekil 1.3. (a) Dünya kömür rezerv dağılımı (b) Türkiye kömür rezerv dağılımı .....	7
Şekil 1.4. (a) Dünya kömür üretim dağılımı (b) Türkiye kömür üretimi dağılımı .....	7
Şekil 1.5. Ülkemizdeki kömür üretim ve tüketim değerlerinin yıllar içindeki değişimi ....	8
Şekil 1.6. Kömürün türlerine göre kullanım alanları (Speight, 2013) .....	9
Şekil 1.7. Kaynaklar bazında (a) dünya ve (b) Türkiye'deki enerji üretimi .....	10
Şekil 1.8. Kömür temizleme yöntemleri .....	15
Şekil 1.9. Su siklonu ile kömür temizlemenin şematik görünümü (Honaker vd., 2013)..	18
Şekil 1.10. Falkon konsantratörünün şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016) .....	20
Şekil 1.11. Kelsey jiginin şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).....	21
Şekil 1.12. Knelson konsantratörünün şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016) ...	22
Şekil 1.13. MGS'nin şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016) .....	23
Şekil 1.14. Flotasyon işlemindeki üç fazlı sistemin (mineral-su-hava) doğrusal temas durumu ve yüzey gerilimleri (Atak, 2017). .....	25
Şekil 1.15. Kolon flotasyonunun şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).....	28
Şekil 1.16. Flokülasyon işleminin şematik görünümü (Panda vd., 2010) .....	29
Şekil 1.17. Yağ aglomerasyonunun genelleştirilmiş akım şeması.....	32
Şekil 1.18. Yağın kömür yüzeyine yayılması (Özer vd., 2016).....	33
Şekil 1.19. Yağ aglomerasyonunda birinci durumda faz dağılımı (Özer vd., 2016) .....	34
Şekil 1.20. Yağ aglomerasyonunda ikinci durumda faz dağılımı (Özer vd., 2016) .....	35
Şekil 1.21. Aglomeratların bağlayıcı sıvı ile doyurulmasıyla oluşan aglomerat yapıları (Özer vd., 2016).....	36
Şekil 1.22. Yağ miktarının artmasıyla oluşan aglomerat tipleri (Özer vd., 2016).....	39
Şekil 1.23. Tunçbilek lavvarının genel akım şeması (Uçar vd., 2017).....	45
Şekil 1.24. Tunçbilek lavvarı şlam tikineri.....	46
Şekil 1.25. Tunçbilek tikinerinden atık barajına giden boru hattı .....	47
Şekil 1.26. Tunçbilek lavvar atık barajından görüntüler (Fotograflar: Tuncay USLU ve Özüm YAŞAR).....	47
Şekil 2.1. Yapılan çalışmalar .....	54



Şekil 2.2.	(a) Hidrosiklon, (b) Tikiner, (c) Hidrosiklondan alınan atık kömür (d) Laboratuvara götürülmek üzere hazırlanan atık kömürler.....	55
Şekil 2.3.	(a) Numunelerin laboratuvara getirilmesi (b) yağ eleme. ....	56
Şekil 2.4.	Tunçbilek lavvar atıklarının XRD analizi.....	58
Şekil 2.5.	Şlamı atılmış (-0,5 +0,025 mm) atıklarının parlak kesit görüntüsü .....	59
Şekil 2.6.	Şlamı atılmış (-0,5 +0,025 mm) atıklarının SEM-EDS analizi .....	60
Şekil 2.7.	Atık bitkisel yağın zeta potansiyeli (Şahinoğlu, 2012).....	61
Şekil 2.8.	Aglomerasyon test görüntüleri ve aşamaları (a) karıştırma, (b) aglomerat kazanımı, (c) aglomeratların yıkanması, (d) aglomeratların yakından görünümü, (e) vakum filtrede aglomeratların yağından arındırılması ve susuzlandırma, (f) yağsız temiz kömür.....	63
Şekil 2.9.	Yağ aglomerasyonu testlerinin akım şeması .....	64
Şekil 3.1.	Yağ dozajı ve katı oranının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	68
Şekil 3.2.	Sodyum Silikat dozajının aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	69
Şekil 3.3.	Sodyum Trifosfat dozajının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	69
Şekil 3.4.	Sodyum Hekzametafosfat dozajının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	69
Şekil 3.5.	Katı oranının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	71
Şekil 3.6.	Yağ dozajının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	72
Şekil 3.7.	Yağ dozajına bağlı olarak aglomerat boyutlarının değişimi.....	73
Şekil 3.8.	Yağ cinsinin aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	74
Şekil 3.9.	Karıştırma hızının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	76
Şekil 3.10.	Karıştırma süresinin aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	77
Şekil 3.11.	Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi (kömür tane boyutu: -500 µm).....	79
Şekil 3.12.	Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi (kömür tane boyutu: -300 µm).....	81
Şekil 3.13.	Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi (kömür tane boyutu: -125 µm).....	82
Şekil 3.14.	Farklı tane boyutu ve yağ dozajlarında aglomerat görüntüleri.....	84
Şekil 3.15.	Yıkama suyu miktarının aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	85
Şekil 3.16.	Ortam pH'ının aglomerasyon performansına etkisi .....	86
Şekil 3.17.	Ortam pH'ının kömürün zeta potansiyeline etkisi.....	87
Şekil 3.18.	Temiz kömürün XRD analizi.....	88
Şekil 3.19.	Atığın XRD analizi .....	88
Şekil 3.20.	(a) Konsantrenin parlak kesit görüntüsü, (b) Atığın parlak kesit görüntüsü ....	89
Şekil 3.21.	Temiz kömürün SEM-EDS analizi.....	90
Şekil 3.22.	Atığın SEM-EDS analizi .....	90

Şekil 3.23. Farklı tuzların kömürün zeta potansiyeline etkisi.....	92
Şekil 3.24. $\text{CaCl}_2$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	93
Şekil 3.25. $\text{MgCl}_2$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	93
Şekil 3.26. $\text{BaCl}_2$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	94
Şekil 3.27. $\text{CuCl}_2$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	94
Şekil 3.28. $\text{ZnCl}_2$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	94
Şekil 3.29. $\text{AlCl}_3$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	95
Şekil 3.30. $\text{FeCl}_3$ tuzunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	95
Şekil 3.31. $\text{AlCl}_3$ tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömürün XRD analizi .....	96
Şekil 3.32. $\text{AlCl}_3$ tuzu kullanıldığında elde edilen atığın XRD analizi .....	96
Şekil 3.33. $\text{AlCl}_3$ tuzu kullanıldığında elde edilen (a) temiz kömür ve (b) atığın parlak kesit görünüşleri.....	97
Şekil 3.34. $\text{AlCl}_3$ tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömürün SEM-EDS analizi.....	98
Şekil 3.35. $\text{AlCl}_3$ tuzu kullanıldığında elde edilen atığın SEM-EDS analizi.....	98
Şekil 3.36. Farklı sürfaktantların aglomerasyon performansı üzerine etkisi .....	100
Şekil 3.37. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında köpük alma süresinin aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	102
Şekil 3.38. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında karıştırma hızının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	104
Şekil 3.39. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında köpürtücü dozajının aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	105
Şekil 3.40. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında tane boyutunun aglomerasyon performansı üzerine etkisi.....	106
Şekil 3.41. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömürün XRD analizi .....	107
Şekil 3.43. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen atığın XRD analizi.....	107
Şekil 3.43. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen (a) temiz kömür ve (b) atığın parlak kesit görünüşleri .....	108
Şekil 3.44. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömürün SEM-EDS analizi.....	109
Şekil 3.45. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen atığın SEM-EDS analizi.....	109

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1	Uluslararası genel kömür sınıflaması (IEA, 2017).....	5
Tablo 1.2.	Kömürleşme derecesine göre ASTM sınıflaması (Tsai, 1982, Ünalan, 2013)...	6
Tablo 2.1.	Kömür tane boyut dağılımı ve bu dağılıma göre kül ve kükürt içerikleri (Havada Kuru) .....	56
Tablo 2.2.	Tunçbilek atık kömür numunesinin tam analizi .....	57
Tablo 2.3.	Tunçbilek atık kömür numunesi elementel analizi.....	57
Tablo 2.4.	Tunçbilek atık kömürünün pridik, sülfat ve organik kükürt tayini.....	57
Tablo 2.5.	Tunçbilek lavvar atıklarının külünde majör oksit analizi.....	58
Tablo 2.6.	Tunçbilek lavvarı atık kömürünün petrografik analizi .....	58
Tablo 2.7.	-500 µm ve -500 +25 µm boyutlu atıkların tam analizi.....	59
Tablo 2.8.	SEM-EDS analizinde belirlenen noktaların elementel analizi .....	60
Tablo 2.9.	Aglomerasyon testlerinin koşulları.....	65
Tablo 2.10.	Aglomerat kazanımında flotasyon testlerinin koşulları .....	66
Tablo 3.1.	Temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi..	91
Tablo 3.2.	AlCl <sub>3</sub> tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi .....	99
Tablo 3.3.	Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi .....	110

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dünya enerji ihtiyacı, nüfusun artması, sanayi ve teknolojideki gelişmelerle beraber çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının %80 gibi çok büyük bir oranı hala yenilenemeyen fosil kaynaklar kullanılarak üretilmektedir (OECD/IEA, 2017a). Fosil kaynaklar içinde kömür, diğer fosil yakıtlara göre çok daha uzun rezerv ömrü, dünyanın her bölgesine yayılmış olması, istikrarlı satış fiyatı, üretim maliyetlerinin düşük ve nakliyesinin kolay olması gibi avantajlara sahiptir. Son birkaç yıl içinde dünya enerji üretiminde kömürün payında düşmeler gözlemlense de uzun vadede incelendiğinde son 15-20 yıllık periyot içinde kömürün enerji üretimindeki payında ciddi artışlar gerçekleşmiştir. 2000’li yıllardan günümüze gelindiğinde dünya kömür üretimi %56 oranında artmış ve enerji üretiminde %28’lik pay ile petrolden sonra ikinci sırada yer almıştır (OECD/IEA, 2017a). Dünya enerji üretiminde önemli bir payı olan fosil yakıtlar Türkiye’nin de enerji üretiminin %88’ini karşılamaktadır. Türkiye’nin enerji üretiminde kömür %27’lik pay ile petrol ve doğalgazdan sonra üçüncü sıradadır (ETKB, 2016). Bu sebeplerle, kömürün israf edilmeden, en verimli şekilde kullanılması çok önemlidir.

Dünya kömür rezervinin yaklaşık %2’si Türkiye’de bulunmaktadır. Bu rezervin %92’si linyit kalan %8 gibi küçük bir miktarı ise taşkömürüdür. Linyitlerimizin büyük bölümü düşük kalorili ve yüksek kül-kükürt içeriklidir (TKİ, 2017). Türkiye’de bu linyitlerin kullanıma hazır hale getirilebilmeleri için birçok lavvar bulunmaktadır. Kömürün üretimi ve temizlenmesi sırasında yaklaşık olarak %15’i toz boyutuna küçülmektedir ve lavvarlarda gang minerallerle beraber toz boyutlu kömürler de genellikle atık barajlarına gönderilmektedir (Gouri Charan, 2016). Bu atıklarla beraber çok yüksek miktarda toz kömür kaybedilmektedir. Ayrıca çevreye de çok ciddi zararlar verilmektedir (Taha vd., 2017). Türkiye’deki en büyük lavvarlarından biri olan Tunçbilek kömür lavvarının atık sahasında yıllar içinde 6 milyon tonun üzerinde atık birikmiştir (Erdem vd., 2010). Şekil 1.1’de Tunçbilek lavvarı atık barajı görülmektedir. Atık barajı gerek kapladığı alan gerekse potansiyel çevre kirleticiliği açısından önemli olduğu gibi içerdiği kömür potansiyeli sebebiyle de önem arz etmektedir.



Şekil 1.1. Tunçbilek lavvar tesisi atık sahası

Kömür biyolojik, kimyasal ve fiziksel yöntemlerle temizlenebilse de ekonomik olarak genellikle fiziksel yöntemler tercih edilmektedir. Kömür, lavvarlarda önce kabaca boyut küçültme işlemine tabii tutulmakta daha sonra sınıflandırılarak farklı yöntemlerle temizlenmektedir. Yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  boyutun altındaki kısım genel olarak atık barajlarına gönderilmektedir. Fakat lavvarlardaki çeşitli sebeplerle oluşan performans düşüklüğü sonucu atık barajındaki kömür boyutu 500  $\mu\text{m}$ 'nin üzerine kadar çıkabilmektedir. Lavvarlarda oluşan ince boyutlu bu atıklardan kömür kazanılması için kullanılacak yöntemler gelişmiş gravite ayırıcıları, su siklonları, flotasyon, flokülasyon ve yağ aglomerasyonu yöntemleridir. Geliştirilmiş gravite ayırıcılarının, toz boyutlu kömürün temizlenmesi için tasarlanmış olsalar da çok karmaşık bir tasarımlarının olması, işletme maliyetlerinin yüksek olması ve nihai ürünün yüksek nem içeriğinden dolayı susuzlandırmanın zor olması gibi dezavantajları vardır (Şahinoğlu ve Uslu, 2014). Su siklonlarının ise ayırma veriminin düşük olması, geniş boyut dağılımı olan kömürlerde etkin ayırma yapılamaması ve yoğunluğu düşük kömürlerde ayırmanın zorlaşması gibi olumsuz özellikleri vardır (Honaker vd., 2013). Flotasyon yöntemi toz kömürlerin temizlenmesinde etkinliği kabul edilmiş bir yöntem olmasına rağmen ortamda özellikle kil mineralleri gibi yüksek miktarda çok ince boyutlu malzeme bulunması yöntemin etkinliğini düşürmektedir (Netten vd., 2016). Flokülasyon yönteminin önündeki engeller ise tamamen serbestleşmemiş kömürlerde etkin olmaması ve yöntemin seçimliliği ile ilgili problemlerdir (Kawatra ve Eisele, 2001). Yağ aglomerasyonu yöntemi toz kömürlerin temizlenmesinde umut vadeden

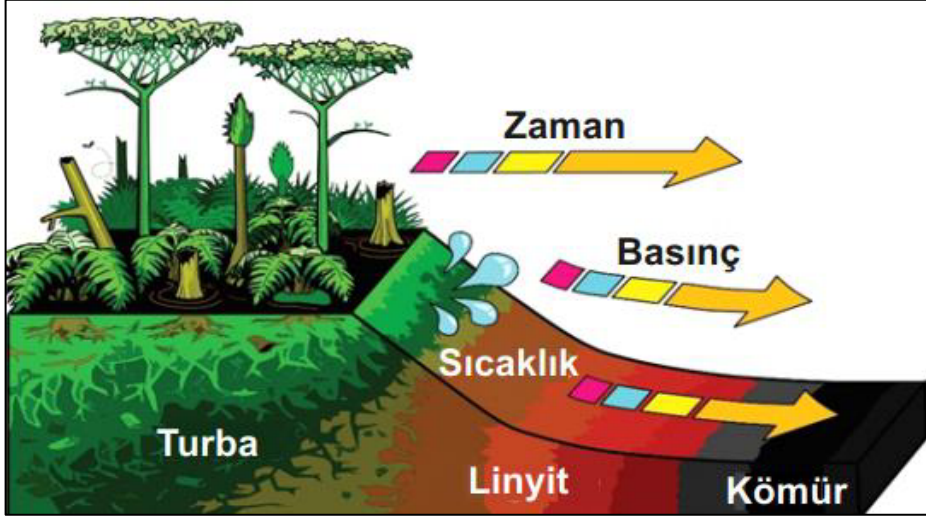
bir yöntemdir (Netten vd., 2016; Netten vd., 2015; Yavuz ve Uslu, 2015). Yağ aglomerasyonu yönteminin, yüksek işlem verimi, oksitli ve yüksek kil içerikli kömürlerdeki başarısı ve aglomeratlarla gang minerallerin ayrılmasının kolaylığı gibi avantajları vardır (Yadav vd., 2017; Şahinoğlu ve Uslu, 2015; Şahinoğlu ve Uslu, 2013). Yağ aglomerasyonu yönteminde, hidrofobik kömür parçacıkları bağlayıcı bir yağ ilavesi ile birbirine yapışmakta ve oluşan aglomeratlar eleme ve flotasyon gibi yöntemlerle gang minerallerinden ayrılmaktadır (Kawatra ve Eisele, 2001).

Bu tez çalışmasında Türkiye Kömür İşletmeleri'ne bağlı Tunçbilek kömür yıkama tesis atıklarından yağ aglomerasyonu yöntemiyle temiz kömür kazanılması amaçlanmıştır. Katı oranı, yağ dozajı, karıştırma hızı ve süresi, çözelti pH'ı, yağ cinsi, tane boyutu, elek boyutu gibi parametrelerin işlem performansı üzerindeki etkileri incelenmiş, ortama tuz ve sürfaktant ilave edilerek ve de aglomerat kazanım yöntemi olarak elek yerine flotasyon kullanılarak performans artırılmaya çalışılmıştır.

## **1.2. Kömürün Tanımı, Oluşumu ve Sınıflandırılması**

Kömür, koyu griden kahverengi-siyaha kadar değişik renklerde parlak veya mat olarak bulunabilen tortul bir kayaç ve fosil yakıttır. Ağırlık olarak %50, hacim olarak da %70'ten fazla kömürleşmiş bitki kalıntılarından oluşur (Ünalın, 2013). Ana bileşeni karbon, hidrojen ve oksijen olan ve az miktarda kükürt ve nitrojen içeren kömür, bünyesinde kül yapıcı inorganik bileşikler ve mineraller de bulundurur (TTKGM, 2016).

Kömür bitkilerin doğa olaylarının etkisiyle zaman içerisinde bozunup fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğraması sonucu oluşur (Şekil 1.2). Bitkilerde fiziksel ve kimyasal değişimlere yol açan doğa olayları arasında bakteri ve mantar hücrelerinin faaliyetleri, oksitlenme, redüklenme, hidroliz ve damıtım ile su ortamındaki ısı ve basıncın etkileri sayılabilir. Fiziksel değişimlerden başlıcaları rengin kararması, parlaklık, sertlik, sıklık ve kırılabilirliğin artmasıdır. Kimyasal değişimler ise esas olarak nemin, hidrojen ile oksijen bileşiklerinden oluşan uçucu maddelerin (karbon dioksit ve metan gazları gibi) kısmen kaybolması, geri kalan maddelerin molekül yapılarının değişmesi, sabit karbon ve kül oranlarının artması şeklindedir. Kömürün oluşumu turbalaşma ve turbaların kömüre dönüşümü olarak ikiye ayrılmaktadır (Ateşok, 2004).



Şekil 1.2. Kömürün oluşumu ve kömürleşme derecesi (URL-1, 2018).

Turbaların oluşumu hakkında genel iki görüş bulunmaktadır. İlk görüşe göre turbalar bataklık ortamında yetişen bitkilerin öldükten sonra aynı noktada birikmesiyle oluşmaktadır. Diğer görüşe göre ise bir bölgede yetişip ölen bitki kalıntılarının zaman içinde taşınarak sulu bölgelerde birikmesiyle başlayan süreçtir. Her iki durumda da ölen bitki topluluklarının mikro-organizmalar tarafından parçalanarak bozunması ve bu bozunan bitki tabakasının üzerinde tekrar bitkiler oluşmaktadır. Biriken bu organik maddenin üzerine yeniden ölen bitki tabakaları birikebileceği gibi daha başka inorganik maddelerde birikebilir. Üzerinde oluşan tabakaların artmasıyla daha önce oluşan tabakalar su seviyesinin altında kalır. Su seviyesinin altında kalan tabakaların oksijen ile teması kesilir ve bozuşma süreci yavaşlar. Daha sonra oluşan jeolojik faaliyetler sonucu bozuşma süreci tekrar hızlanarak devam eder. Bitki kalıntılarında oluşan bu organik maddelerin bozunması sonucunda hidroliz, oksitlenme ve indirgenme süreçlerinden oluşan biyokimyasal değişiklikler sonucunda turbalar oluşur. Turbalar, organik maddelerin hümik asite sonrasında hümik asitlerin hümüne dönüşmesiyle oluşan ve bozunmaya devam eden organik maddelerdir (Ateşok, 2004).

Turbaların kömüre dönüşümü ise turbaların üstündeki tabakaların basıncı, dağ oluşumları ve tektonik olaylar ile oluşmaktadır. Yer kabuğundaki basılma ve yükselme gibi hareketler ile alt seviyelere inen turba yatakları, üzerinde biriken kil, kum ve marn gibi tabakaların altında sıkışır. Sıkışan turba yatakları yer kabuğu hareketleri, üst katmanlardan gelen basınç, kimyasal reaksiyonlar ve yeraltı kaynaklarından gelen ısıların etkisiyle kömüre dönüşür (Ateşok, 2004).

Kömürler, özellikleri bakımından çok farklılık gösterdiklerinden dolayı sınıflandırılması için kullanılabilecek çok fazla değişken vardır. Bu değişkenlerin içinde genellikle ısı değeri, sabit karbon, uçucu madde, nem ve hidrojen yüzdeleri baz alınmıştır. Bu nedenle birbirine benzeyen ve çakışan birçok sınıflama sistemi vardır. (Ateşok, 1986). Uluslararası ilk kömür sınıflaması, Uluslararası Kömür Kurulu tarafından ve Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) katkısıyla 1957 yılında oluşturulmuştur. Tablo 1.1’de görüldüğü gibi taş kömürü ve kahverengi kömürler olmak üzere iki ayrı gruba ayrılarak sınıflandırılmıştır (TTKGM, 2016).

Tablo 1.1. Uluslararası genel kömür sınıflaması (OECD/IEA, 2017b).

<b>Taşkömürü</b>	Koklaşabilir Kömür	Koklaşma özelliğine sahip kömür (Metalurjik kömür)
	Bitümlü Kömür ve Antrasit	Koklaşma özelliğine sahip olmayan kömür (Buhar kömürü)
<b>Kahverengi Kömür</b>	Alt Bitümlü Kömür	4165-5700 kcal/kg kalorifik değerli kömür
	Linyit	4165 kcal/kg’ın altında kalorifik değerli kömür

Bu ilk sınıflama dışında kömürleri sınıflandırmak için 30’a yakın sınıflandırma sistemi vardır. Bunlar içinde en çok kullanılanı Tablo 1.2’de görülen ASTM sınıflamasıdır. Ayrıca ASTM sınıflaması kömürleşme derecesi esas alınarak oluşturulmuş bir sınıflama sistemidir (Ateşok, 1986).

Linyitler görünüşlerine göre yumuşak linyitler ve sert linyitler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yumuşak linyitler üretimden sonra toz haline gelmektedirler. Bu nedenle evsel yakıt olmaya uygun değildir. Yumuşak linyitlerden sert linyitlere geçildiğinde nem oranı düşer ve buna bağlı olarak parça sağlamlığı artarak toz oluşumu düşer (Kemal ve Arslan, 1999).

Taşkömürlerinin nem içerikleri Tablo 1.2’de görüldüğü gibi diğer kömür türlerine nazaran oldukça düşüktür ve yüksek miktarda karbon içermektedirler. Nem içeriklerinin düşük olmasından dolayı parça bütünlüklerini korurlar. Kömürleşme derecesine göre çok farklı yapıda taş kömürleri bulunmaktadır. Bunlar içinde az kömürleşmeye uğramış ve ileri derecede kömürleşmeye uğramış kömürlerin uçucu madde oranı koklaşmaya uygun



olmadığından dolayı koklaşamazken bu iki grubun arasında bulunan % 18-36 oranında uçucu madde içeren taş kömürleri kok üretiminde kullanılmaktadır (Kemal ve Arslan, 1999).

Tablo 1.2. Kömürleşme derecesine göre ASTM sınıflaması (Tsai, 1982; Ünalın, 2013).

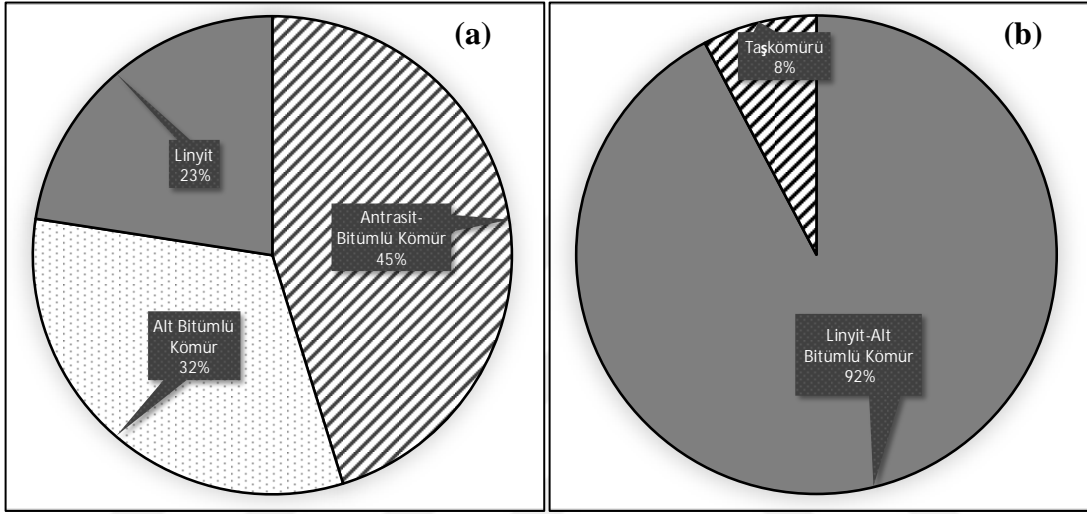
Kömürleşme Derecesi		Sabit Karbon (%)	Uçucu Madde (%)	Isıl Değer (kcal/kg)	Nem İçeriği (% Ağırlık)
Sınıf	Grup				
Linyit	Linyit B	62-76	44-69	≤ 3500	30-50
	Linyit A			3500-4610	
Alt Bitümlü Kömür	Alt Bitümlü C	71-80	40-52	4610-5275	12-30
	Alt Bitümlü B			5275-5835	
	Alt Bitümlü A			5835-6390	
Taş Kömürü	Yüksek Uçuculu B	76-86	29-50	7220-7780	2-15
	Yüksek Uçuculu C			5835-7220	
	Yüksek Uçuculu A	78-88	31-49	≥ 7780	1-5
	Orta Uçuculu	69-78	22-31	≥ 7780	1-5
	Düşük Uçuculu	78-86	14-22		
Antrasit	Yarı-antrasit	86-92	8-14	≥ 7780	1-5
	Antrasit	92-98	2-8		
	Meta-antrasit	≥ 98	≤ 2		

### 1.3. Kömürün Önemi, Rezervleri, Üretimi ve Tüketimi

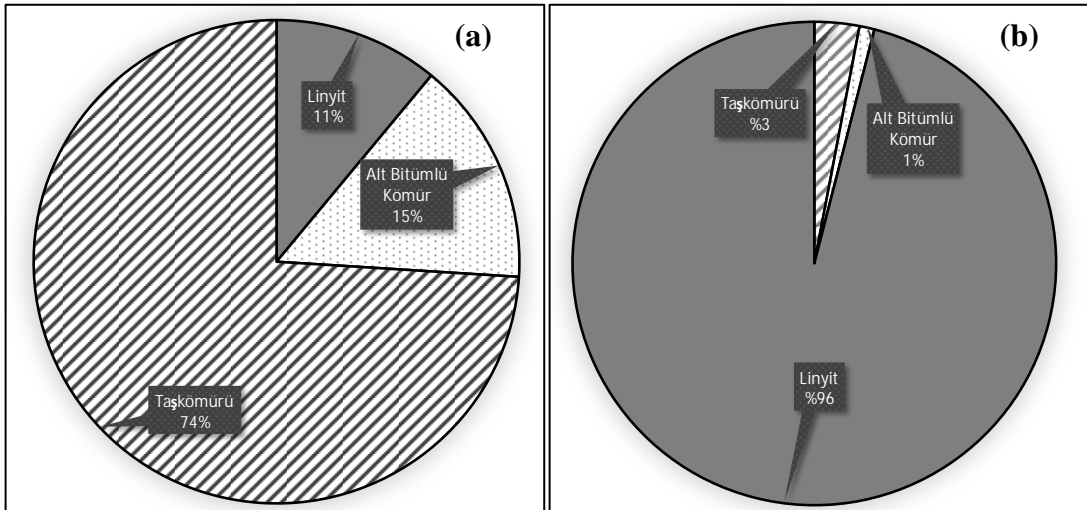
Kömür, diğer fosil yakıtların içinde en fazla rezerve sahip olmasından dolayı oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra diğer fosil yakıtların aksine sadece belirli bir coğrafik bölgede değil dünyanın her yerine homojen olarak yayılmıştır ve üretim maliyeti daha düşüktür. Ayrıca kömürün kullanımı, nakliyesi ve depolanması yine diğer fosil yakıtlardan daha güvenli, kolay ve ucuzdur. Bütün bu avantajlarından dolayı kömür önemli bir fosil yakıttır. Kömürün, en yoğun kullanıldığı sektör olan elektrik üretimi dışında, oldukça geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bu alanların başında demir-çelik ve çimento üretimi, endüstriyel proseslerde buhar üretimi ve evsel yakıt olarak kullanımı gelmektedir (Ateşok, 2004).

Dünya toplam kömür rezervi 1,1 trilyon tondur ve bu rezervin yaklaşık %23'ünü linyit oluşturmaktadır. Türkiye dünya toplam kömür rezervinin yaklaşık %2'sini yani 16,9 milyar ton kömür rezervini bulundurmaktadır. Bu rezervin 15,6 milyar tonu linyit ve alt bitümlü

kömür olup kalan kısmını ise taşkömürü oluşturmaktadır (Şekil 1.3 a ve b). Dünya toplam kömür üretimi son 40 yıl içinde 2 katından fazla artarak 2016 yılında 7,27 milyar ton seviyesine çıkmıştır. Şekil 1.4 a'da görüldüğü gibi üretimin büyük bölümünü taşkömürü oluşturmakta ve onu sırasıyla alt bitümlü kömürler ve linyit üretimi izlemektedir. 2016 yılı dünya kömür tüketiminin %76'sını taşkömürü ve bitümlü kömür, %13'ünü alt bitümlü kömür ve kalanını da linyit oluşturmaktadır.

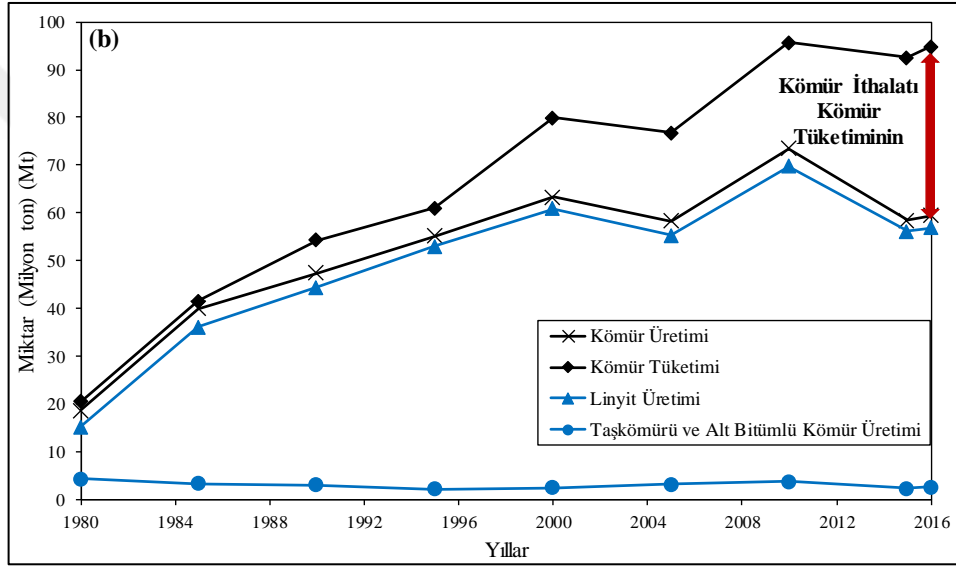


Şekil 1.3. (a) Dünya kömür rezerv dağılımı (b) Türkiye kömür rezerv dağılımı



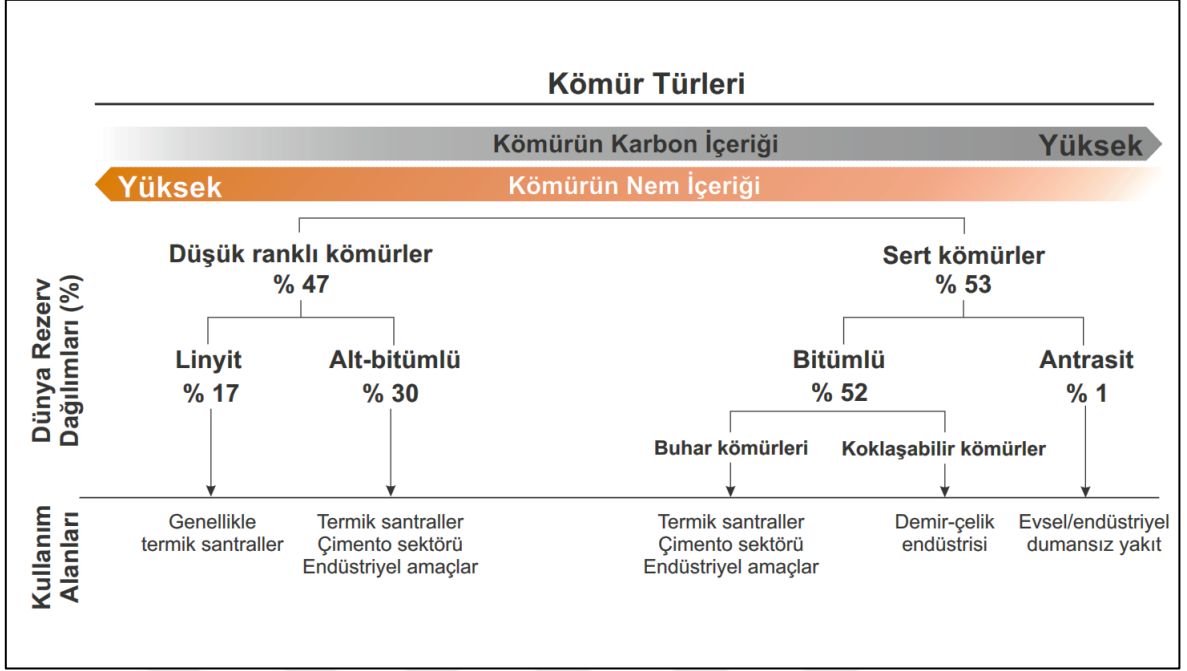
Şekil 1.4 (a) Dünya kömür üretim dağılımı (b) Türkiye kömür üretimi dağılımı

Şekil 1.5’de görüldüğü gibi Türkiye’nin kömür üretimi son 40 yıl içinde 5 kat artarak 2016 yılında 59,4 milyon tona ulaşmıştır. Üretim tamamına yakını linyit oluşturmaktadır. Kömür tüketimi ise 7-8 kat civarı artarak 94,8 milyon tona ulaşmıştır (OECD/IEA, 2017b). Türkiye kömür tüketimi açısından bakıldığında tükettiği kömürün %35’ten fazlasını başka ülkelerden karşılamaktadır. 2016 yılı kömür tüketiminin %61’i linyit, %31’ini taşkömürü oluştururken kalanı da alt bitümlü kömür tüketimidir (OECD/IEA, 2017b). Türkiye’nin ithal ettiği kömürün %80’ninden fazlasını taşkömürü oluştururken kalanı da alt bitümlü kömürüdür.



Şekil 1.5. Ülkemizdeki kömür üretim ve tüketim değerlerinin yıllar içindeki değişimi

Şekil 1.6’da görüldüğü gibi dünya genelinde üretilen linyitin büyük bir kısmı elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Alt bitümlü kömürlerin bir kısmı elektrik üretiminde kullanılırken kalan kısmı çimento fabrikalarında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Buna ek olarak bitümlü kömürlerin koklaştırılabilenleri demir-çelik endüstrisinde kullanılırken, koklaşmayanlar yine elektrik üretiminde, çimento fabrikalarında ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Antrasitler ise evsel ya da endüstriyel boyutta dumansız yakıtlar olarak tercih edilmektedir. Türkiye’de üretilen linyitin %90’ına yakını ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye’nin ithal ettiği kömürün yaklaşık yarısı ise ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır (OECD/IEA, 2017c). Şekil 1.6’da da farklı kömür türlerinin kullanım alanları genel olarak gösterilmiştir.

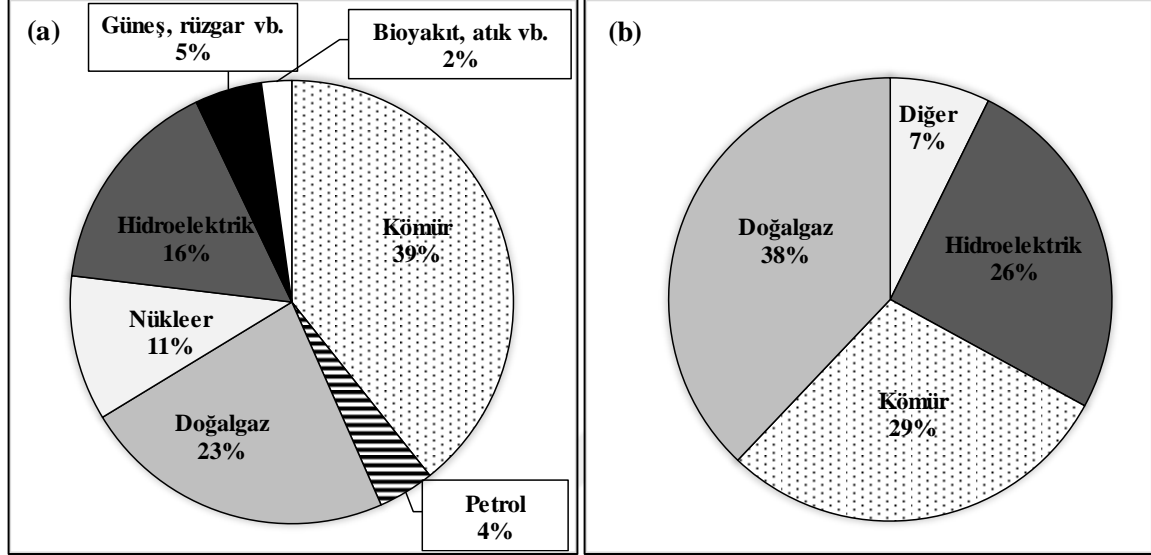


Şekil 1.6. Kömürün türlerine göre kullanım alanları (Speight, 2013).

Çağımızın en büyük ihtiyacı ve tüketimi olan enerji ve enerji üretiminin büyük bölümünü oluşturan kömür günlük yaşamın en temel bileşenidir. Dünya nüfusunun artmasıyla enerji talebi artarken, sanayinin ve teknolojinin gelişmesiyle beraber kişi başına düşen enerji tüketimi de artmaktadır. Artan bu ihtiyaçlarla beraber dünya elektrik üretimi son 40 yıl içinde yaklaşık 4 kat artarak 2015 yılında 24.344 TWh'e ulaşmıştır. Dünyadaki bu elektrik üretiminin %66'sı kömür, petrol ve doğalgazın aralarında bulunduğu fosil yakıtlardan üretilmektedir. Şekil 1.7a'da görüldüğü üzere dünya toplam elektrik üretimi içinde kömür %39'luk pay ile fosil yakıtlar içinde ilk sıradadır ve ayrıca fosil yakıtlar bazında üretimin %59'unu karşılamaktadır (OECD/IEA, 2017c). Kömür, ülkelerin elektrik ihtiyaçlarını düşük maliyetlerle karşılaması sebebiyle gelecekte de önemini sürdürecektir ve stratejik önemini önümüzdeki 30 yıl daha koruyacağı öngörülmektedir (World Energy Council, 2016).

Türkiye elektrik üretimi ise 1990 yılından bu yana 5 kattan fazla artarak 2015 yılında 262 TWh'e ulaşmıştır. Bu üretimin %68'i fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Türkiye'nin toplam elektrik üretimi içinde kömür %29'luk pay ile doğalgazdan sonra ikinci sırada yer almaktadır (Şekil 1.7b). Ayrıca fosil yakıtlar bazında elektriğin %43'ü kömürden üretilmektedir (OECD/IEA, 2017c). 2016 yılında ise Türkiye'de 274 TWh'lik elektrik

üretimi gerçekleştirilmiş olup, bu üretimin %66'sı fosil yakıt bazlıdır. Kaynaklar bazında elektrik üretiminin en büyük bölümü %33'lük payı ile kömüre aittir (EÜAŞ, 2016).



Şekil 1.7. Kaynaklar bazında (a) dünya ve (b) Türkiye'deki enerji üretimi

#### 1.4. Kömür Temizlemenin Önemi ve Gerekçeleri

Yeraltından ya da açık ocaktan çıkarılan kömürün, içinde kömür olmayan tabakalar ve parçalar içermesinden dolayı heterojen bir yapısı ve oldukça değişken bir kalitesi vardır (Gouri Charan, 2016). Kömür temizleme, kullanıma sunulmadan önce kül oranını düşürmek ve ısı değerini yükseltmek amacıyla kömür içindeki safsızlıkların uzaklaştırılması için yapılan işlemler bütünüdür. Kömürün içerdiği safsızlıklar, mineral madde içeriği ve nem içeriğidir. Temizleme işlemleri sırasında mineral madde içeriği azaltılmaya çalışılırken, nem içeriği ise temizleme işlemlerinin son adımında stoklama veya termik kurutma yolu ile uzaklaştırılabilir (Özbayoğlu ve Kemal, 2014). Kömür temizleme günümüzde standart bir ürün elde etmek ve kül içeriğini azaltmak için kullanılırken bazı ülkeler kükürt içeriğinin azaltılmasına daha fazla önem vermektedir.

Kömür temizlemeye ve üretmeye olan ihtiyaç ilerleyen yıllarda şu sebeplerden dolayı artacaktır;

- ✓ Yüksek kaliteli kömür damarlarının tükenmesi,
- ✓ Mekanize kazının tüvenan kömürdeki safsızlıkları arttırması,
- ✓ Atık bölümün taşınması için ekonomik olmayan yüksek nakliye maliyetleri,

- ✓ Piyasanın daha yüksek kalitelide kömür talep etmesi,
- ✓ Yüksek kömür üretme maliyetleri, en uygun verimle kömür temizleme yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılması,
- ✓ Çevre kirliliğinin kontrolü (Gouri Charan, 2016).

Kömür temizlemeye duyulan ihtiyacın artmasının sebebi tüketici talepleri ve üreticinin ihtiyaçları ile ilgiliyken, aynı zamanda geçmişten daha çok çevresel kısıtlamaların geliştirilmiş olmasıdır. Mekanize kazının gelişmesiyle yüksek üretim kapasitelerine ulaşılması ocaktan çıkarılan kömürün geçmişe göre daha küçük boyutlu, nemli ve kirli olmasına sebep olmuştur. Bu nedenle kömür temizlemeye olan ihtiyaç da artmıştır. Mineral maddelerin olumsuz etkilerinden dolayı, kömür temizleme günümüzde düşük kömür kalitesinin etkilerini terse çevirmek için ya da madenlerdeki yoğun mekanizasyondan kaynaklanan tüvenan kömürdeki fazla mineral madde içeriğini temizlemek için sıklıkla kullanılmaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016).

Kömürün yapısında kirlilik olarak adlandırılan mineral içeriği değişik miktarlarda bulunmaktadır. Kömür, içerdiği mineral maddeler sebebiyle tam olarak yanmaz. Kömürün içerdiği safsızlıkların kalitesi ve yapısı genel olarak birkaç faktör ile ilişkilidir. Bunlardan biri kömür tabakalanması sırasında ortaya çıkan sedimantasyon koşullarıdır. Diğerleri ise kömür üretimi sırasında uygulanan kömür çıkarma ve yükleme yöntemidir. Kömürün beraberinde bulunan mineral maddenin olumsuz etkileri şunlardır (Rao ve Gouricharan, 2016);

- ✓ Belirlenen limitlerin üzerindeki mineral madde içeriği kömür temizleme verimliliği etkilemektedir,
- ✓ Mineral maddenin kömürle birlikte taşınması maliyeti arttırmaktadır ve ısı değerini düşmesine sebep olmaktadır,
- ✓ Termik santrallerde, beslenen kömürdeki fazla miktardaki kül miktarı yatırım miktarını arttırmaktadır aynı zamanda bakım ve işletme ile ilgili zararlara sebep olmaktadır,
- ✓ Demir çelik endüstrisinde, kok kömürünün kül içeriğindeki %1'lik artış üretimi %3-6 azaltmaktadır ayrıca kömür tüketimini %4-5 arttırmaktadır,
- ✓ Kömür ile çalışan buharlı lokomotiflerin yüksek kül içeriği çalışma maliyetini arttırmaktadır.

Mekanize madencilik yöntemlerinin geniş çaplı kullanımına olan ihtiyacın dışında, kömür temizlemenin giderek artmasına ve kömür temizleme yöntemlerinin artan

karmaşıklığına sebep olan diğer faktörler ise şu şekilde sıralanabilir (Rao ve Gouricharan, 2016);

- ✓ Tüketicilerin verimliliklerini arttırarak maliyetlerini düşürmek için kömür kalitesine yeni sınırlar koymaları,
- ✓ Tüketicilerin sürekli aynı kalitede ürün talep etmeleri,
- ✓ Toplumun dikkatlerini potansiyel kömür kaynaklı kirleticiler üzerine yoğunlaştırması,
- ✓ Hükümetlerin, belirli miktarda kül içeren temiz kömür üretimi için tüm kömürlerin temizlenmesini talep etmesi,
- ✓ Üreticinin madenden çıkan satılabilir kömür miktarını arttırmak istemesi.

Düşük yanmayan madde içeren temizlenmiş kömür aşağıdaki avantajları sunmaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016);

- ✓ Daha verimli yanma ve birim başına daha yüksek ısı miktarı,
- ✓ Isının maksimum verimle kullanılması,
- ✓ Düşük nakliye ve taşıma giderleri,
- ✓ Daha iyi temizleme ve daha az kül.

Temizlenmiş kömür elektrik üretimi için de önemli olup aşağıdaki avantajları sağlamaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016);

- ✓ Üretim verimliliğinin ve tesis emre amadeliliğinin artması,
- ✓ Ekipman kapasitesinin artması,
- ✓ Yedek güç ekipman ihtiyacının azaltılması,
- ✓ Yatırım maliyetlerinin azaltılması,
- ✓ Daha az aşınma ve nakliyeden dolayı işletme ve bakım maliyetlerinin azaltılması,
- ✓ Daha düşük taşıma giderleri,
- ✓ Daha az miktarda safsızlık ve gelişmiş kömür kalitesi,
- ✓ Hava kalitesi kontrol sistemi üzerindeki yükün azaltılması,
- ✓ Meydana çıkan katı atık miktarının azaltılması,
- ✓ CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> ve partikül emisyonlarının azaltılması.

### 1.5. İnce Kömür Oluşum Sebepleri, Kayıpları ve Geri Kazanım Gerekliliği

Kömür üretim noktalarında, özellikle de yeraltı kömür madenciliğinde mekanizasyonun artmasıyla, üretimde seçimlilik azalmış ve atık miktarı artmıştır. Kömür üretiminde kullanılan sürekli kazıcı ve kesici yükleyiciler tavan ve taban taşını da kömürle beraber üretmektedirler. Günümüzde kömürü üretmek ve taşımak için kullanılan cihazlar geçmişten daha küçük boyutlu kömürün oluşmasına sebep olmaktadır. Döner kesici kafalar, kırıcılar ve taşıyıcı bant sistemindeki aktarım noktaları kömürü küçük boyutlara indirmektedir ve böylece ince kömür parçacıkları oluşmaktadır (NRC, 2002). Ayrıca kömürün temizlenmesi sırasında serbestleşerek safsızlıklarından ayrılması için kırılarak boyutunun küçültülmesi de çok fazla miktarda ince boyutlu kömür oluşmasına sebep olmaktadır (Gouri Charan, 2016). Bütün bu faaliyetler sonunda çok büyük miktarlarda küçük boyutlu kömür atığı oluşmaktadır. Bu atık kömürlerin kazanılması zordur ve geri kazanma verimleri düşüktür. Fakat kömürün tamamının kullanılması sürdürülebilir bir gelişme ve çevreyi korumak için son derece stratejik ve gerçekçi bir öneme sahiptir (Xie, 2010).

Kömür üreticileri yıllar boyunca ince kömürle ne yapacakları konusunda çözümler üretmeye çalışmışlardır. İnce kömür tanımlaması değiştikçe ürettikleri çözümlerde zaman içinde değişmiştir. Geçmişte üretilen kömürün %25'i ince kömür olarak değerlendirilmiştir (Theodore, 1985). Günümüzde ise üretilen kömürün %15'i ince kömür olarak sınıflandırılmaktadır (Gouri Charan, 2016). Yıllar içinde kömür üreticilerinin ince kömür olarak tanımladıkları boyut küçülmüştür. Yıllar boyunca ince kömürlerle mücadelede en ekonomik yöntem atık barajlarının kullanılmasıydı. Bu durum, atık barajlarında çok miktarda geri kazanılabilir enerji kaynağının birikmesini sağlamıştır. 30 yıl öncesinde bile atık barajlarında bulunan kömür miktarı 1 milyar tonun üzerindeydi. Madencilik ve kömür fiyatlarının artmasıyla beraber atıklardaki kömürün kazanımı ekonomik hale gelmeye başlamıştır (Theodore, 1985). İnce boyutlu kömürlerin temizlenmesi ya da geri kazanılması konusu son 30-40 yıldır yoğun olarak araştırılmaktadır (Henry, 2012).

Dünyada 2700'den çok daha fazla lavvar tesisi bulunmaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016). Günümüzde üretilen kömürün %55-60'nın temizleme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Temizlenen kömürün ise tahminen %70'i temiz kömür %30'u atık olarak ayrılmaktadır (Henry, 2012). Kömürün enerji üretiminde ve diğer alanlarda giderek artan kullanımını ve önemi kömürün üretilmesi ve temizlenmesi faaliyetleri sırasında oluşan ve biriken atık kömürün geri kazanılmasını zorunlu hale getirmektedir.



Çoğu lavvarda tüvenan kömürün yaklaşık %20'si 0,5 mm'nin altındadır ve bu boyuttaki kömürlerin etkin olarak temizlenememesi sebebiyle oldukça fazla miktarda kömür atık barajlarına gitmektedir. Bu durum kömür ihtiyacı olan ülkeler için çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmakta ve enerjide dışa bağımlılığı olumsuz etkilemektedir. Türkiye'de 1 milyon tonun üzerinde kazanılabilir kömür bu şekilde atılmaktadır. Sadece Türkiye Kömür İşletmelerinin Tunçbilek sahasında 6 milyon tonun üzerinde kömür içerikli atık vardır (Yaşar ve Uslu, 2016).

Kömürün üretilmesi ve temizlenmesi sırasında oluşan bu atıklar yıldan yıla artmaktadır. Bu artışın sebeplerinden biri kömür madenciliğindeki mekanizasyonun ve kazı derinliğinin artmasıyla kömür kalitesi düşmekte ve üretilen kömürde oluşan küçük ve çok küçük boyutlu bölümün miktarının da artmasıdır (Xie, 2010). Ayrıca kalitesi düşen bu kömürün kendi içindeki safsızlıklara ek olarak beraberinde tavan ve taban taşı da üretilmektedir (NRC, 2002). Beraberinde kül yapıcı minerallerle üretilen bu kömürün miktarı arttıkça, kömürün yüzdürülebilirliği de azalmaktadır. Bu nedenle oluşan atık miktarı artarken, ince boyutlu kilerden dolayı da susuzlandırma işlemleri zorlaşarak atık hacminin de artmasına sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak temiz kömür tüketicileri artan bir şekilde daha az kül ve su içerikli kömür talep etmelerinden dolayı daha çok atık oluşmaktadır (Xie, 2010).

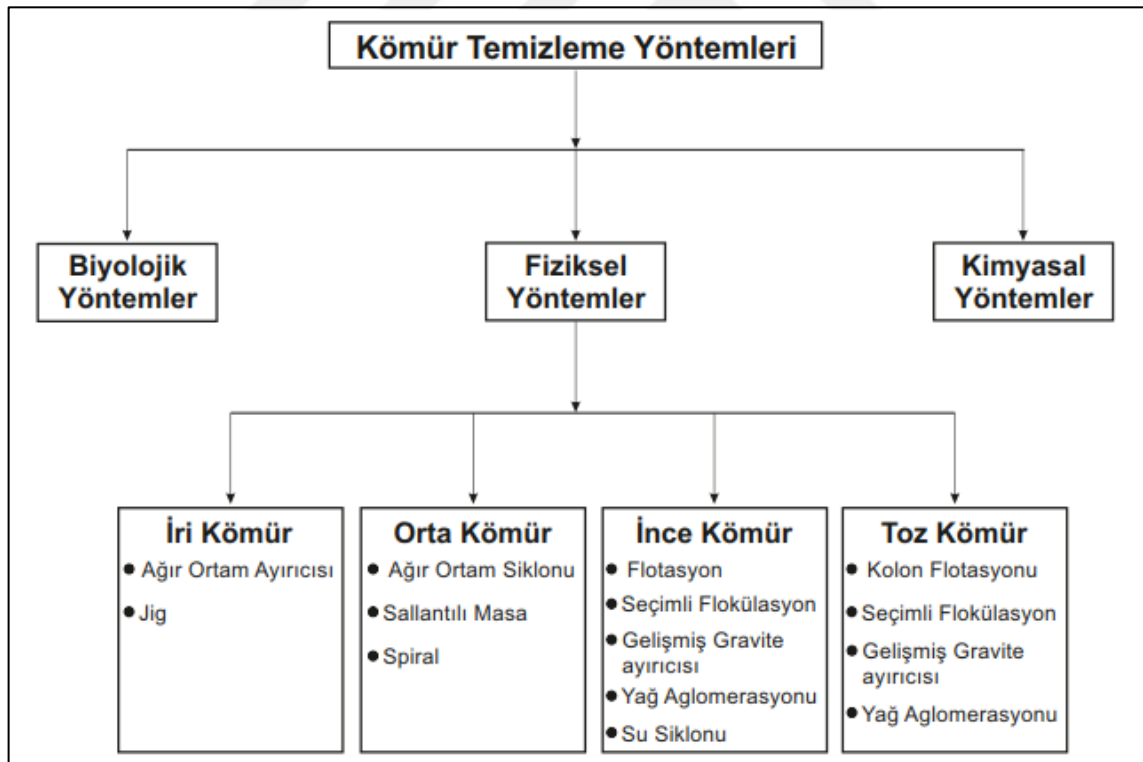
Kömür atıkları ile ilgili çeşitli riskler vardır. Bunlar, atık alanının jeoteknik açıdan duraysızlığı ve erozyonu, kömür atıklarının kendiliğinden yanması veya patlaması tehlikesidir. Bu sebeplerle meydana gelmiş ölümlü ve yaralanmalı kazalar rapor edilmiştir. Ayrıca asit üretimi ve metal salınımı, yüzey ve yeraltı suyunun ve toprağın kalitesini etkileyebilir. Buna ek olarak, ekosisteme ve yaşam alanlarına zarar vererek gözle görülebilir şekilde doğanın estetik yapısını etkiler (Taha vd., 2017).

Lavvarlarda oluşan ince boyutlu kömür atıkları hem madencilik hem de temizleme aşamalarında azaltılabilir ya da yok edilebilir. Örneğin, seçimli madencilik yanmayan malzemenin miktarını azaltmaktadır. Ancak, günümüzde işletilen kömür damarlarının çoğu düşük kaliteye sahiptir ve ihtiyaçları karşılayabilmek için bu damarlarında üretilmesi gereklidir. Diğer bir seçenek ise ince kömür atığının temizlenmiş olan iri kömüre katılmasıdır. Kömür yaş proseslerle temizlendiği zaman ince kömür temizleme oranına bağlı olarak oluşan atıkta ince boyutlu kömür, yanmayan malzemeler (kül) ve su oluşmaktadır. Oluşan bu şlam malzemenin miktarı ince kömür temizleme oranı arttırılarak en az seviyeye indirilebilir. Hacmini azaltmak için ise susuzlandırma yapılarak malzemenin su oranı

azaltılabilir. İnce kömür temizleme atıklarının miktarını ve hacmini azaltma işlemleri, kömürün özelliklerine, kullanılan yöntem ve seyreltme yöntemine bağlı olarak değişir. Temizleme gereksinimleri genellikle işletmeciye dayatılmaktadır ki işletmecinin kömür temizleme ve atık imha etme imkanları çevre ve bölgesel koşullarla sınırlanmaktadır. (NRC, 2002). Sonuç olarak, atıklardaki küçük boyutlu bu kömürlerin temiz kömür olarak kazanılması en ideal çözümdür.

### 1.6. Kömür Temizleme Yöntemleri

Kömür temizleme yöntemleri, biyolojik, kimyasal ve fiziksel olarak üç gruba ayrılabilir da (Şekil 1.8) biyolojik ve kimyasal yöntemler kullanılarak kömürün temizlenmesi günümüz şartlarında ekonomik değildir. Bu sebeple kömürün temizlenmesi genellikle fiziksel yöntemlerle yapılır.



Şekil 1.8. Kömür temizleme yöntemleri

Kömür hazırlama, ilk başlarda, tüketici tarafından talep edilen uygun boyut aralıklarının taşıma bantlarından el ile toplanmasına dayanmaktaydı. Kömürün içindeki

safsızlıkların mekanik yıkama ile uzaklaştırılması 19.yy'ın ikinci çeyreğinde başlamıştır. Ancak bu uygulamanın yaygınlaşması yüz yıldan fazla bir vakit almıştır. Modern kömür hazırlama teknolojisi 1915-1940 yılları arasında Avrupa'da toplanmıştır. Kömürün metalürjik, kimyasal ve sentetik yakıt olarak kullanılmasının artmasından ve dünya çapındaki enerji kıtlığından dolayı kömürün dünya çapında kullanımı hızlı bir şekilde artmıştır. Günümüzde dünyanın çeşitli bölgelerinde birçok farklı kömür yıkama tesisi bulunmaktadır. Bu tesislerin kapasitesi 70 ile 5000 ton/saat arasında değişebilmektedir. Bazı tesisler sadece basit bir kırma eleme tesisi kullanırken, bazıları çok karmaşık akım şemalarına sahip olabilmektedir (Gouri Charan, 2016).

Kömür temizlemenin ticari uygulamaları daha çok fiziksel ayırma yöntemleriyle sınırlıdır. Tipik bir kömür zenginleştirme tesisinde kömürün ilk olarak kabaca boyutu küçültülür ve boyuta göre sınıflandırılır. Ardından her boyuta göre farklı yöntemler kullanılarak safsızlıklarından ayrılır ve son olarak susuzlandırma ve kurutma işlemlerine tabi tutulur. Kömür temizleme tesisinin amacı uygun kalitede üretilmiş kömürü ekonomik bir şekilde tüketiciye sunmaktır (Gouri Charan, 2016).

Kömür temizleme yöntemleri, temizlemenin yapıldığı ortama göre, kömürün fiziksel özelliklerine göre ve kömürün tane boyutuna göre farklılık göstermektedir. Kömür temizleme yöntemleri, kuru ve yaş olarak ayrılmaktadır. Kuru temizleme yapan ayırıcılar ayırma ortamı olarak havayı kullanan ve ayırma derecesi kötü olan ekipmanlardır (Özbayoğlu ve Kemal, 2014). Kömürün fiziksel özelliklerine göre temizlenmesinde, kömürün beraberindeki mineral maddenin fiziksel özellikleri kömürünkinden ne kadar farklı ise ayırma o kadar kolay yapılmaktadır (Kemal ve Arslan, 1999). Kömür, cevher zenginleştirilmesinin aksine serbestleşme boyutuna ufanmadan işlem görmektedir. Kömür temizlenmeden önce kabaca 10-20 cm'nin altına kırılır. Daha sonra iri, orta ve ince boyuta ayrılan kömür her bir boyut için farklı cihaz ve yöntemler kullanılarak temizlenir (Özbayoğlu ve Kemal, 2014). Modern tesislerde temizleme ve susuzlandırma işlemlerinde dört ayrı boyut sınıfı kullanılmaktadır. Bunlar, iri boyutlu kömür (>10mm), orta boyutlu kömür (10-1 mm), ince boyutlu kömür (1-0.15mm) ve çok ince boyutlu kömür (<0,15mm) olarak ayrılmaktadır (Aaron ve Gerald, 2015). Farklı boyutlardaki kömürlerin temizlenmesinde kullanılan yöntemler Şekil 1.8'de gösterilmektedir.

## 1.7. İnce Kömür Temizleme Yöntemleri

İnce kömürlerin temizlenmesi, iri boyutlu kömürlerin temizlenmesine göre belirgin bir avantaj sağlar. Çünkü parçacık boyutu küçüldükçe serbestleşme arttığı için temizlenebilirlik artmaktadır. Fakat iri kömür temizlemede tipik olarak kullanılan ağır ortam ayırmaları gibi yöntemlere kıyasla ince ve çok ince kömürlerin temizlenmesi için kullanılan yöntemlerin ayırma etkinlik performansları çok daha düşüktür. Temizlenecek kömür tane boyutu küçüldükçe yatırım ve işletme maliyetleri üssel olarak artmaktadır. Bunun nedeni, temizleme ünitelerinin daha düşük üretim kapasitesine sahip olmaları, reaktif gereksinimleri, nihai ürünün susuzlandırılmasının zorluğu ve oluşan ince atıklarla başatme güçlüğüdür. Genellikle üründe kabul edilebilir nem değerine ulaşamaması, ince kömür fraksiyonlarının geri kazanım kabiliyetini sınırlar (Honaker vd., 2013).

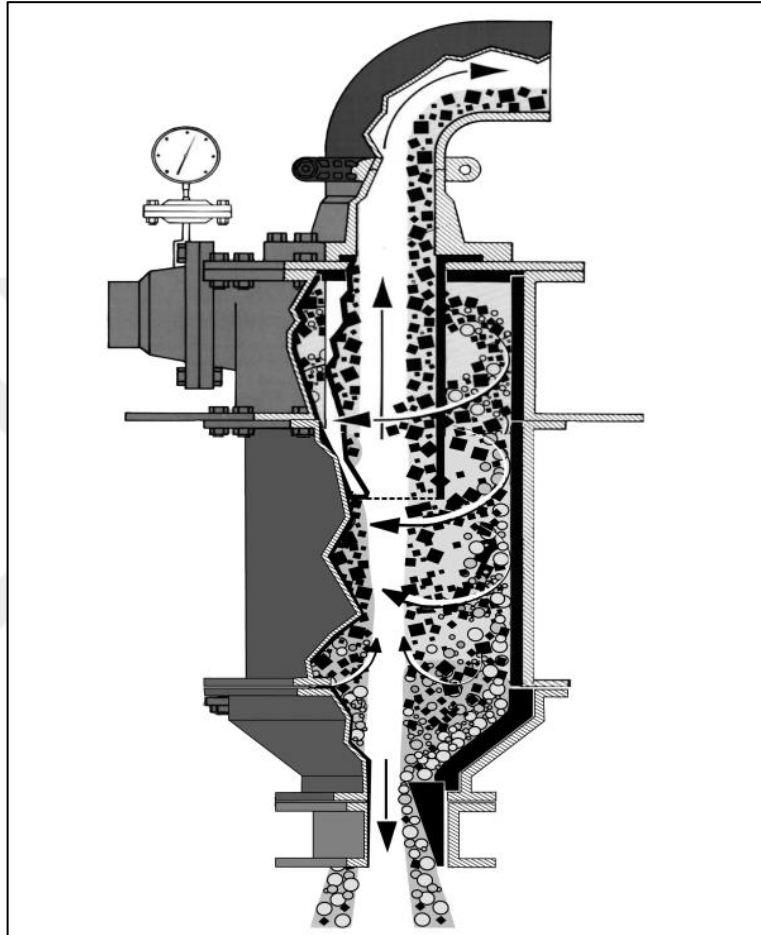
Kömür temizlemeyi sınırlandıran nem sorunlarına rağmen kuru temizleme yöntemleri ticari olarak uygun bir seçenek olarak değerlendirilmemiştir. Bunun büyük ölçüde nedeni yoğunluk farkına dayalı ayırmanın ortam olarak havanın kullanılmasıyla yeterli kapasitede ve büyüklükte uygulanamamasıdır. Taneciklerin yüzey yük farklılıklarına dayanan elektrostatik ayırmada, yüzey neminin kontrolünün zorluğundan kaynaklı sınırlı bir başarı elde etmiş ve ticari ölçekte geliştirilememişlerdir. Manyetik ayırıcılar, kömürün kazanlara toz halinde beslenmeden önce temizlenmesinde ticari ölçekte sınırlı olarak kullanılmıştır. Genel olarak, ayırma verimliliği açısından yaş prosesler daha etkindir (Honaker vd., 2013).

Lavvara beslenen malzemenin %10-20 arası ince ve çok ince kömür olarak belirlenmesine rağmen yayınlanan raporlara göre yaklaşık %50'sinin 1 mm'den daha küçük boyutlu olduğu bilinmektedir. Bu miktar kömürün kırılabilirliğine, çıkarılırken kullanılan yöntem, çıkarılan kömürün taşınma sistemine ve malzeme için belirlenen üst boyuta ulaşmak için kullanılan kırıcıların bir fonksiyonu olarak belirlenmektedir. İnce kömürler genellikle 1 mm ile 0,15 mm arasındaki boyutlardaki kömürler olarak sınıflandırılırlar. Geleneksel ağır ortam zenginleştirmeleri tane boyutu 0,15 mm'ye yaklaştıkça yetersiz kalmaktadır (Honaker vd., 2013).

### 1.7.1. Su Siklonları

Su siklonları 1950'lerden beri 1 mm'nin altındaki kömürlerin temizlenmesi için kullanılmaktadır (Şekil 1.9). Su siklonları yatırım maliyetlerinin düşük olması,

tasarımlarının basit olması ve ayırma ortamı olarak suyu kullanmasından dolayı geniş ölçüde ilgi görmektedir (Shah, vd., 2002). Fakat ayırma etkinlikleri düşüktür (Honaker vd., 2013). Bu nedenle ince kömürlerin temizlenmesinde kullanılırken etkin bir ayırma için iki aşamalı olarak kullanılmaktadır (Osborne, 2012).



Şekil 1.9. Su siklonu ile kömür temizlemenin şematik görünümü (Honaker vd., 2013).

Su siklonları malzemeleri yoğunluk farkına dayalı olarak birbirinden ayırmaktadır. Su siklonlarında, kömür su karışımı olan besleme malzemesi siklonun silindirik tepesinde bulunan besleme ağzından teğetsel olarak girer. Bu teğetsel kuvvet pülpe girdap hareketini verir. Bu durum, düşey eksen boyunca oluşan bir düşük basınç bölgesinin oluşmasıyla siklon içinde girdap oluşumuna yardım etmektedir. Siklonun düz kısmında  $120^\circ$  koni açısına sahip sabit bir yatak meydana gelmektedir. Bu yatağın içinde, yüksek çökme hızlarına sahip olan parçacıklar yoğunluk ve boyuta göre ayrılmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip parçacıklar

yatağın üstüne doğru hareket etmektedirler ve üst akımla birlikte alınmaktadır (Gouri Charan, 2016). Yoğunluğu kömürden yüksek olan atık malzeme de siklon duvarı boyunca aşağıya doğru hareket ederek alt bölümden alınır (Yıldız, 2014).

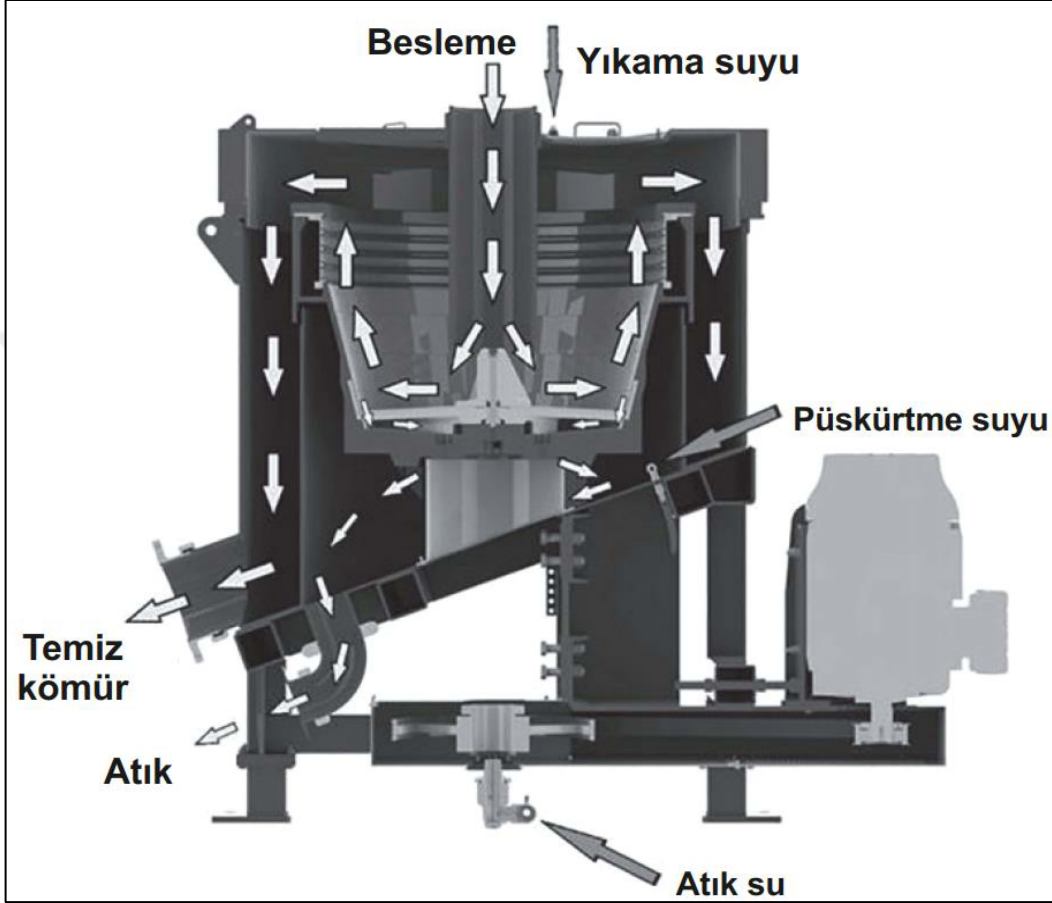
### **1.7.2. Geliştirilmiş (Santrifüjlü) Gravite Ayırıcıları**

Gravite ayırıcıları tane boyutu 0,5 mm boyutundan büyük ve aralarındaki yoğunluk farkı yüksek parçacıkların etkin bir şekilde ayrışmasını sağlamaktadır. Boyutu küçük ve aralarındaki yoğunluk farkı düşük olan parçacıkların gravite ayırıcıları ile ayrışma hızı, cihazın malzemeyi cihaz içinde hareket ettirme hızından düşüktür. Bu nedenle, etkin bir ayırma gerçekleşmemektedir (Rao ve Gouricharan, 2016). Santrifüjlü ayırıcılar, santrifüj kuvveti sayesinde parçacığın üzerindeki gravite kuvvetin yarattığı kuvvetten 300 kata kadar daha fazla kuvvet oluşturmaktadır. Bu kuvvet sayesinde küçük tanecikler yoğunluklarına göre bir ayrışma göstermektedirler (Acarkan ve Önal, 2014). Santrifüjlü ayırıcılar, santrifüj kuvvetinin dönen tambur veya hazneye beslenen pülpe uygulanması ile su ortamında ayırma yapan cihazlardır. Bu cihazlar kömürlerin temizlenmesinde 45 µm ve daha küçük boyutlarda bile etkili ayırma sağlamaktadırlar. Kömür ve piritin arasındaki yüksek yoğunluk farkından dolayı kömürden piritin uzaklaştırılması içinde etkili bir yöntemdir. Falcon konsantratörü, Kelsey Jigi, Knelson Konsantratörü ve Mozley Multi Gravite Ayırıcısı (MGS) santrifüjlü ayırıcılardandır (Rao ve Gouricharan, 2016).

#### **1.7.2.1. Falkon Konsantratörü**

Falkon konsantratörü, dikey eksen çevresinde dönen akışkan yataklı ve kesikli çalışan geliştirilmiş bir gravite ayırıcısıdır. Falkon konsantratörü kesik koni şeklindeki yüzeyin çok hızlı bir şekilde dönmesi şeklinde çalışır. Bu sistemde temizlenecek malzeme, koninin tabanına yakın bir noktaya enjekte edilir ve santrifüj kuvvetiyle koninin cidarına doğru hızlanır. Besleme ürününün ardından gönderilen basınçlı su ile besleme akışkanlaştırılarak, pülpün parçacık yoğunluklarına göre tabakalanmaları sağlanır (Şekil 1.10). Tabakalanmanın en üstünde bulunan hafif parçacıklar koninin üst kenarından alınırken, ağır olan parçacıklar ise koninin iç yüzeyindeki boşluklara hapsolürler (Honaker, vd., 1995). Periyodik olarak besleme durdurularak bu ağır parçalar alınır. Otomatik kontrol

edilen durulama suyu, gerekli olan tenör ve verime göre belirlenir. Koni dönme hızı ve tabakalanmayı sağlayan su miktarı falkon konsantratörünün iki önemli değişkenidir (Rao ve Gouricharan, 2016).



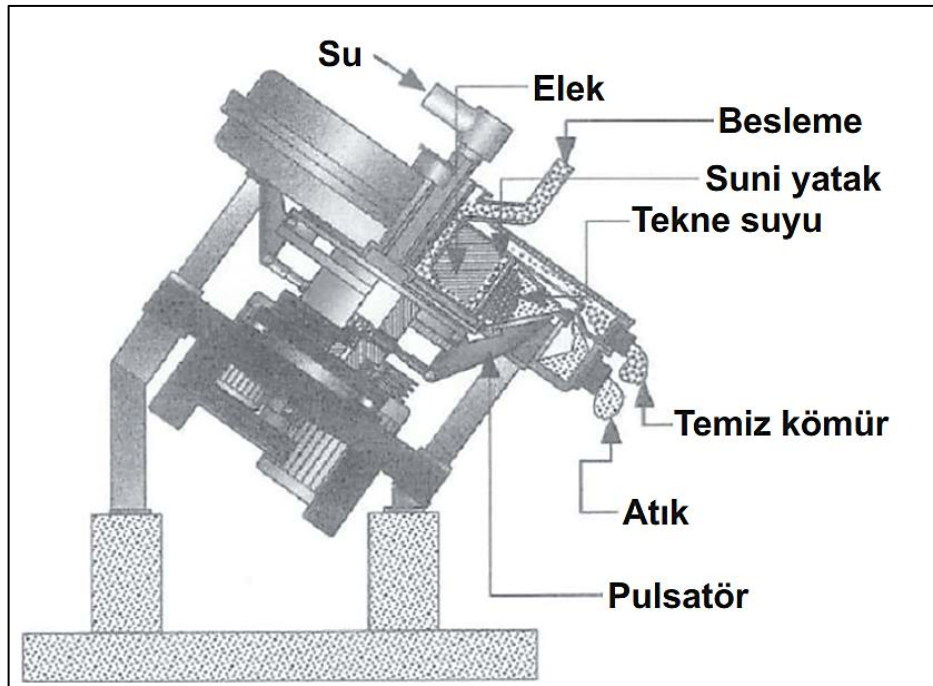
Şekil 1.10. Falkon konsantratörünün şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).

Falkon konsantratöründe sisteme beslenen kömür miktarını, atık miktarı tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlamayı önlemek için, kazan hızını değiştirerek atık oranını düzenleyen kontrol sistemleri önerilmiştir. (Rao ve Gouricharan, 2016).

Falkon konsantratörü 15-20  $\mu\text{m}$  boyutundan küçük parçacıkların da zenginleştirilmesinde kullanılabilir. Diğer cihazlara göre nispeten mekanik olarak daha basit ve sağlamdır. Yüksek kapasiteli ve daha az operatör dikkati gerektirmektedir. (Rao ve Gouricharan, 2016).

### 1.7.2.2. Kelsey Jigi

Tek santrifüjlü jigdir olarak bilinen Kelsey jigi Chris Kelsey tarafından Avustralya'da geliştirilmiştir. Temel olarak, Kelsey jigi santrifüj alanına dik olarak yerleştirilmiş bir Harz jigidir (Şekil 1.11). Dönen bir hazne çevresine yerleştirilmiş olan teknelerden oluşmaktadır (Kantarcı, 2009). Bu tekneler, darbe suyunu tutar ve çıkış ağzından konstantre malzemeyi tahliye eder. Haznenin içinde, üçgen şeklindeki bir elek, yapay bir yatak oluşturmak için bulunmaktadır. Darbeyi bir diyafram sağlamaktadır. Farklı yoğunluklara sahip ve ayrılmaya meyilli olan ağır ve hafif minerallerin yoğunlukları arasında bir yoğunluk değerine sahip olan suni yatak malzemesi eleğin üzerinde toplanmaktadır. Malzeme üst taraftan beslenmekte ve 60 Gs değerine ulaşabilen merkezkaç kuvveti hazne tarafından uygulanmakta ve bu kuvvet de pülpü suni yatak malzemesi ile temas etmeye zorlamaktadır. Darbe kollarının yüksek frekanslı ve sıralı vuruşları, suyun içe doğru bir darbe yapmasına neden olmakta ve bu sayede de suni yatak genişleyip daralmaktadır. Bu sayede de yoğunluk farkından dolayı suni yatak ve besleme malzemesi farklı ivmelere sahip olmaktadır. Yoğunluğu ağır olan taneler suni yataktan geçerek tahliye ağzından konsantre kısma dökülürken düşük yoğunluğa sahip taneler suni yatağın üstünden akarlar (Rao ve Gouricharan, 2016).



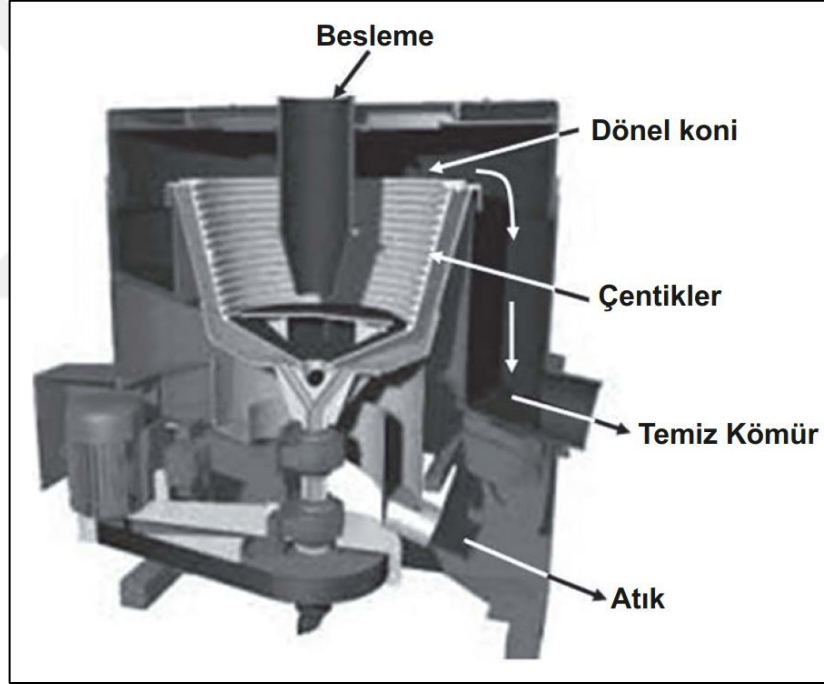
Şekil 1.11. Kelsey jiginin şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).



Yatırım maliyetleri dikkate alındığında, suni yatak malzemesinin kazanımı ve besleme hazırlama aşamasındaki fazla eleme Kelsey jiginin dezavantajları arasında gösterilmektedir. Ancak, bu jig sayesinde diğer jigler ile ayrılması mümkün olmayan küçük boyutlu taneler kazanılabilmektedir (Kökkılıç, 2011).

### 1.7.2.3. Knelson Konsantratörü

Knelson konsantratörü, ağır minerallerin kazanılması için dizayn edilmiş pratik bir akışkan yataklı santrifüj ayırıcısıdır (Honaker ve Das, 2004; Majumder, vd., 2007). Parçacık üzerine etkiyen gravite kuvvetin 200 katı kadar santrifüj kuvveti uygulanmaktadır.



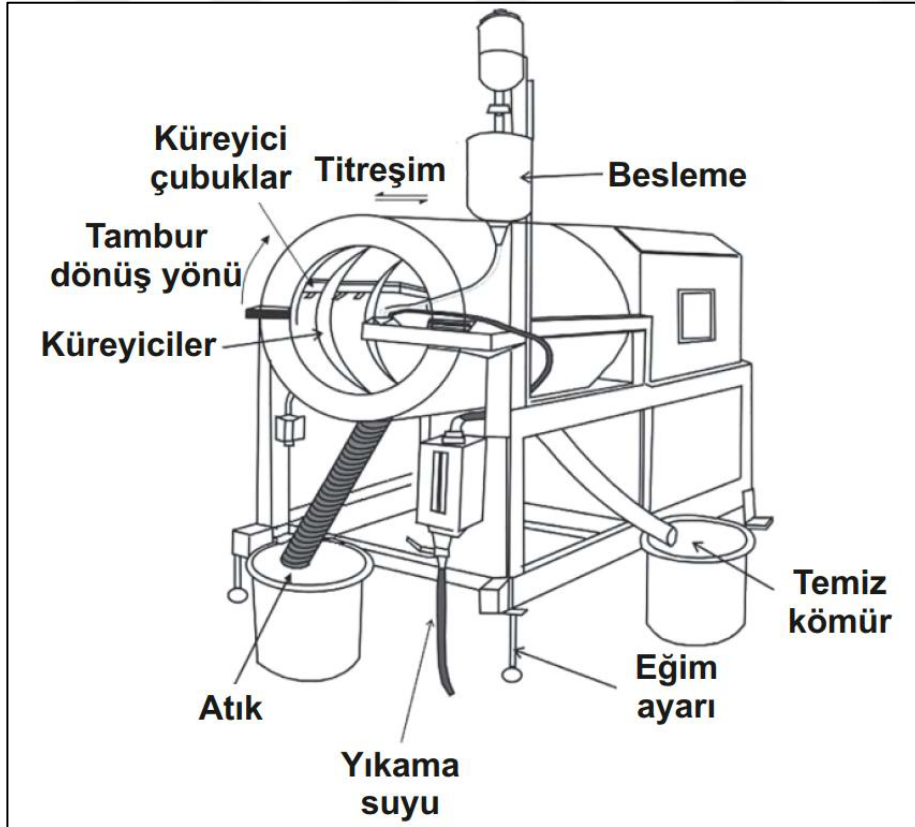
Şekil 1.12. Knelson konsantratörünün şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).

Knelson konsantratörü, çeşitli halka tipindeki bölümlerle basamaklandırılan, dönen kesik bir koni şeklinden oluşur (Şekil 1.12). Koninin içindeki delikler boyunca dönen koniye su verilir. Temizlenecek malzeme, dönen koniye sabit bir besleme tüpü ile gönderilir. Cihaza beslenen ürün besleme tüpüyle, koni tabanına ulaştıktan sonra santrifüj kuvvetinin etkisiyle dışa doğru yani koni duvarına doğru harekete zorlanır. Koninin içindeki her bir halka pülp ile akışkan bir yatak oluşturacak şekilde dolmaya başlar. Koninin içi pülp ile dolduktan

sonra, koni içinde optimum yataklanmayı sağlayacak şekilde suyun akışı kontrol edilir. Akışkan yatak içinde yüksek yoğunluklu parçacıklar koni içinde kalırken, yoğunluğu düşük parçacıklar koninin üstünden yıkama suyu ile boşatılır. Konsantrenin tamamen temizlendikten sonra, ağır olan kısım koni içinden alınır. Knelson konsantratörünün endüstri için sürekli sistem olarak çalışan modelleri mevcuttur. Sistemin en önemli dezavantajı ise malzemenin yataklanmasını sağlamak için çok fazla miktarda temiz suya ihtiyaç duyulmasıdır (Rao ve Gouricharan, 2016).

#### 1.7.2.4. Mozley Multi Gravite Ayırıcısı (MGS)

MGS olarak bilinen Mozley Gravite Ayırıcısı, Richard Mozley tarafından İngiliz Teknoloji Grubu'nun desteğiyle yapılmıştır. Cihaz ince ve çok ince kömürlerin temizlenmesi için üretilmiştir (Rao ve Gouricharan, 2016). MGS'nin tamburu bir tarafı açık, diğer tarafı kapalı poliüretanla kaplı bir silindirden oluşmaktadır (Şekil 1.13). Silindirin açık ucuna doğru iç astar daralarak konik bir yüzey oluşturmaktadır (Yıldız, 2014).



Şekil 1.13. MGS'nin şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).

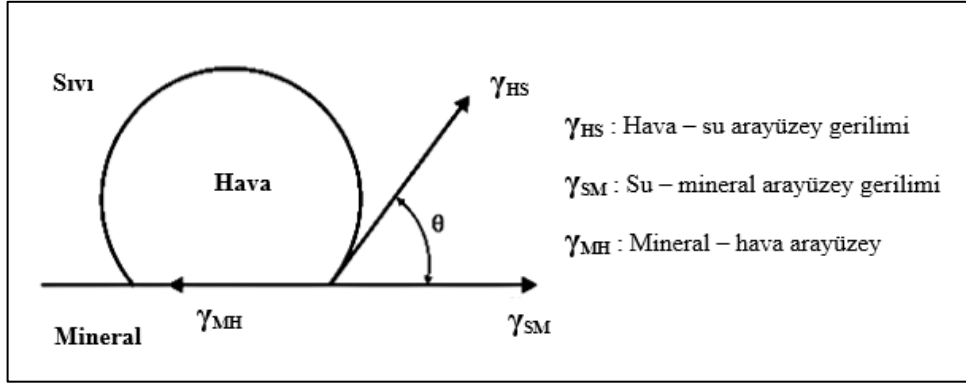
MGS'nin çalışma prensibi, sarsıntılı masa yüzeyinin bir tambur şekline dönüştürülüp döndürülmesiyle oluşan cihazda, su tabakası içinde zenginleştirilecek parçacıkların üzerine normal gravite kuvvetinin birçok kat fazlasının uygulanmasına dayanmaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016). Bu hareket sonrasında yüksek yoğunluklu mineraller tamburun iç yüzeyinde yarı katı bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabakanın hemen üzerinde ikinci bir tabaka oluşurken en üstte tamamına yakını su olan bir tabaka oluşmaktadır. Sarsıntılı masadakine benzer şekilde verilen salınım hareketiyle akışkan tabakanın içindeki minerallerin ayrılması sağlanmaktadır. Santrifüj kuvvetiyle tamburun iç çapına yapışan ve salınım hareketiyle ilerleyen yüksek yoğunluklu malzeme sıyrılcılar ile taşınarak üst çıkıştan ve daha üst tabakaları oluşturan daha hafif yoğunluklu malzemeler ise suyun akışı ile beraber alt çıkıştan elde edilmektedir.

MGS ile yapılan ayırma işleminde taneler üzerine etkiyen merkezkaç kuvveti klasik sarsıntılı masada tanelerin üzerine etkiyen yer çekimi kuvvetinin 6-24 g kat daha fazlasıdır. Bu sayede farklı yoğunluktaki tanelerin ayrılması için gereken süre düşerken benzer şekilde eşdeğer ürün için gerekli ayırma yüzey alanı azalmaktadır (Yıldız, 2014).

### 1.7.3. Flotasyon

Flotasyon, çok ince boyutlarda ayrılabilen minerallerin zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Flotasyon terimi ilk başlarda sudan ağır minerallerin su yüzeyinde yüzmesiyle ifade edilmekteydi. Günümüzde ise minerallerin çeşitli reaktifler ile muamele edildikten sonra yüzeylerinde havaya karşı ve suya karşı oluşturulan seçimli ilgilerinden yararlanarak yapılan bir zenginleştirme yöntemidir. Yöntemde zenginleştirilecek malzemenin yüzey özellikleri kadar, kullanılan reaktifler de malzemenin su sever ve hava sever hale gelmesinde önemli bir paya sahiptir (Atak, 2017).

Flotasyon yöntemi katıların sıvı ortam içinde gaz kabarcıklarına yapışarak birbirinden ayrılmasını sağlar. Bu üç faz, yüzdürülen katı fazı, çeşitli iyonları barındıran sıvı veya su fazı ve kabarcıkları meydana getiren gaz fazı daima bir arada bulunur. Flotasyon işleminin başarısında üç fazın özelliklerinin yanında, her bir fazın bir diğeriyle oluşturduğu arayüzeyin özellikleri de önemlidir (Çilek, 2006). Şekil 1.14'de görülen üç arayüzeyin denge durumu Young eşitliği ile açıklanmaktadır.



Şekil 1.14. Flotasyon işlemindeki üç fazlı sistemin (mineral-su-hava) doğrusal temas durumu ve yüzey gerilimleri (Atak, 2017).

Üç fazdan oluşan bu sistem içinde, iki faz bir yüzey boyunca birbirine değerken üçüncü faz bir doğru boyunca temas halindedir. Bu üç fazın denge durumunda toplam yüzey gerilimi Eşitlik 1'den görüleceği gibi sıfır olur. Flotasyon sistemindeki mineral, su ve hava fazının yüzey gerilim dengesi ise Eşitlik 2'deki gibi olmaktadır. Şekil 1.14'de görüldüğü gibi mineral yüzeyi ile hava-su arayüzeyi arasındaki açığa temas açısı denir. Temas açısı Eşitlik 3'deki gibi gösterilmektedir ve ayrıca bu denkleme "Young Eşitliği" denilmektedir.

$$\gamma_{HS} + \gamma_{SM} + \gamma_{MH} = 0 \quad (1)$$

$$\gamma_{HS} \cdot \cos \theta = \gamma_{MH} - \gamma_{SM} \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{MH} - \gamma_{SM}}{\gamma_{HS}} \quad (3)$$

Young eşitliğinden yararlanılarak, temas açısı  $90^\circ$ 'den küçük olduğunda  $\gamma_{MH} > \gamma_{SM}$  ve temas açısı  $90^\circ$ 'den büyük olduğunda  $\gamma_{MH} < \gamma_{SM}$  olacağı söylenebilir. Üç fazın temas durumunun dengede olabilmesi için Eşitlik 4 olmalıdır. Aynı zamanda Eşitlik 4 mineralin yüzebilme şartını gösterirken, Eşitlik 5'de mineralin bastırılmasını göstermektedir (Atak, 2017).

$$\gamma_{MH} - \gamma_{SM} \leq \gamma_{HS} \quad (4)$$

$$\gamma_{MH} - \gamma_{SM} > \gamma_{HS} \quad (5)$$

Flotasyon işleminde cevherin içerdiği mineralin veya mineral grubunun susever ve susevmez hale getirilmesi için çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Bu kimyasallar kullanılma sırasına göre düzenleyiciler, toplayıcılar ve köpürtücüler olarak gruplandırılmaktadır.

Flotasyon işleminde sadece yüzdürülmesi istenilen mineral tanelerinin yüzeylerinin toplayıcı ile reaksiyona girmesi istenirken diğer mineral tanelerinin toplayıcıdan etkilenmemesi istenir. Ayrıca bazı mineral tanelerinin yüzeyi toplayıcı ile direk reaksiyona girecek özellikte olmayabilir. Bu gibi durumlar için flotasyon işleminde kullanılan reaktiflere düzenleyiciler adı verilmektedir. Başlıca düzenleyici reaktifler bastırıcı, canlandırıcı ve diğer düzenleyici reaktiflerdir.

Toplayıcılar cevher içindeki yüzdürülmek istenilen mineralin yüzeyini susevmez yapan organik bileşiklerdir. Toplayıcıların pülp içine atıldıklarında çözünerek veya pülp içinde dağılarak yüzdürülecek mineralin yüzeyine fiziksel veya kimyasal olarak adsorblanması gerekmektedir.

Flotasyonda düzenleyici ve toplayıcı reaktifler ilave edildikten sonra küçük çaplı ve kararlı kabarcıklar oluşturmak için köpürtücü eklenir. Köpürtücüler su-hava arayüzeyine adsorblanarak yüzey gerilimini düşürür ve bu sayede pülp içine verilen hava küçük kabarcıklar halinde dağılır. Pülp içinde dağılan bu küçük hava kabarcıklarıyla çarpışan toplayıcı kaplı susevmez mineral taneleri flotasyon hücresinden köpük ile beraber kazanılır (Çilek, 2006).

Flotasyon yöntemi 20. yüzyılın başlarında cevher zenginleştirilmek için kullanılmaya başlanmasına rağmen kömür temizlemede ilk olarak 1920 yılında kullanılmaya başlanmıştır (Ateşok, 2004). Kömür temizlemede flotasyon 4 amaç için kullanılmaktadır:

- ✓ Yıkama suyunda kalan toz kömürü kazanmak,
- ✓ Lavvardan atılan proses suyunu temizleyerek çevre kirliliğini önlemek,
- ✓ Kömürdeki kükürdü gidermek,
- ✓ Kömürde bulunan çeşitli maseralleri ayırarak, koklaşabilir kısımlar hazırlamak için kullanılmaktadır (Oruç, 2006).

Kömürün doğal yüzebilirliği kömürleşme derecesine, kimyasal ve petrografik yapısına bağlı olarak değişir. Kömürleşme derecesi arttıkça, kömürlerin oksijen, hidrojen miktarı ve uçucu madde oranları azalırken karbon miktarı artmaktadır. Karbon miktarı %89 oranına kadar olan kömürlerin yüzebilirliği artarken, bu değerden sonra yüzebilirlik azalmaktadır. Kömürün nem miktarı arttıkça flotasyon başarısı düşmektedir. Kömürleşme arttıkça, yani linyitten antrasite doğru gidildikçe azalan nem miktarıyla kömürün yüzebilme yeteneği artmaktadır (Abakay Temel, 2007).

Kömür flotasyonunda toplayıcı olarak nötr hidrokarbonlar, fuel-oil ve kerosen tipi yağlar kullanılmaktadır. Kömürleşme derecesi arttıkça kullanılması gereken toplayıcı

miktarı azalmaktadır. Köpürtücü olarak ise çam yağı, kresilik asit ve çeşitli alkol türleri kullanılmaktadır (Ateşok, 2004).

### 1.7.3.1. Kolon Flotasyonu

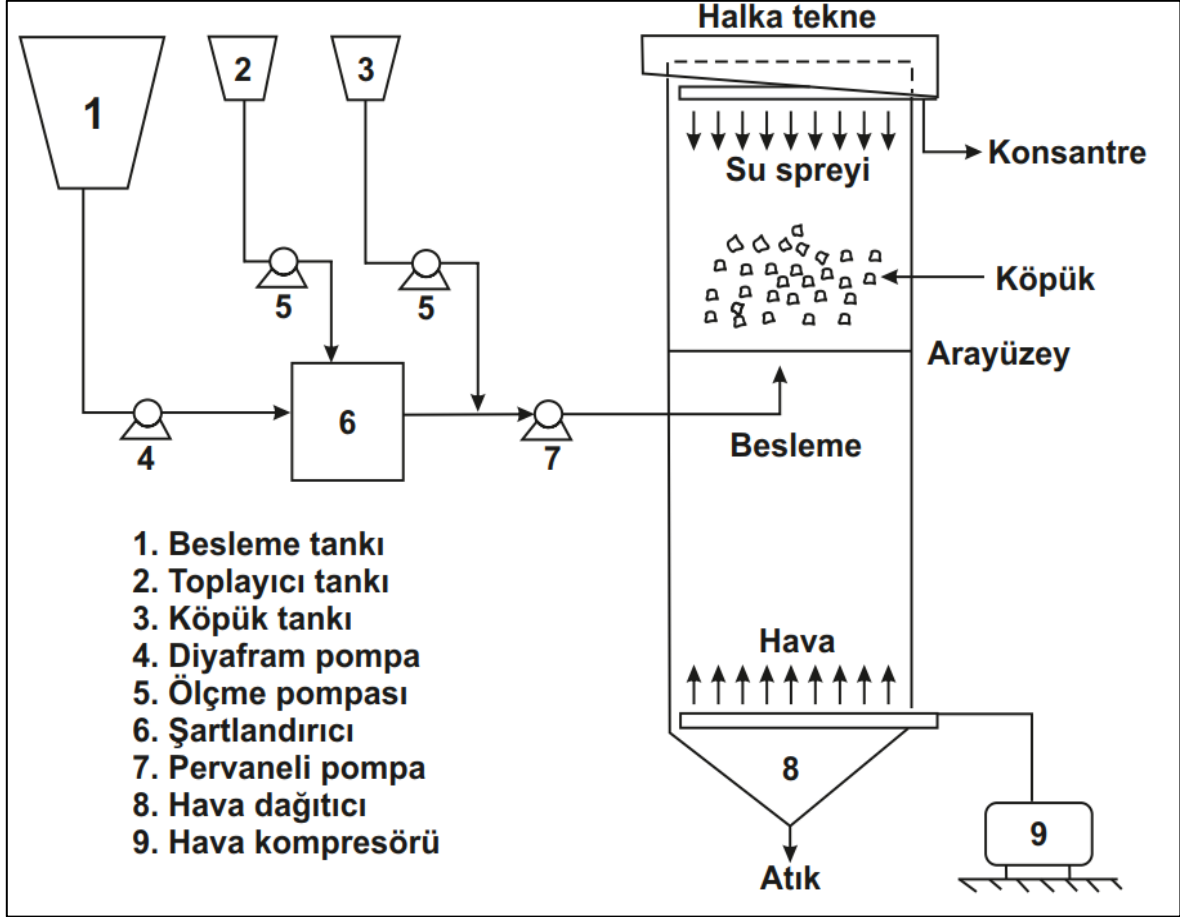
Kolon flotasyonu hem dizaynı hem de çalışma şekli bakımından klasik mekanik flotasyon cihazlarından farklıdır. Kolon flotasyonunun temel prensibi hava kabarcıklarının ve katı taneciklerin ters akımıdır. Şekil 1.15’de görüldüğü gibi hava kabarcıkları kolonun altına yerleştirilen dağıtıcıdan püskürtülen hava ile yaratılmaktadırlar. Gaz kabarcıkları, pülpün aşağıya doğru hareketine karşın yukarı doğru hareket ederler. Hidrofobik mineral taneciklerinin hava kabarcıklarına yapışması, flotasyon bölgesi olarak da bilinen besleme ile hava giriş bölgesi arasındaki alt zenginleştirme bölgesinde meydana gelmektedir. Flotasyon bölgesindeki köpük temizleme bölgesine doğru hareket eder. Temizleme bölgesi, kolonun üst bölgesinden gelen yıkama suyuna ters yönde hareket ederek sürüklenen atık tanecikleri köpükten ayırarak flotasyon bölgesine geri göndermektedir (Aplan ve Arnold, 1991; Gouri Charan, 2016).

Klasik flotasyon kolonunda, yüzebilen tanecikler içeren besleme pülp yukarı yönlü hareket eden hava kabarcıkları ile temas etmeleri için pülp bölgesine püskürtülmektedir. Hava kabarcığı ve tanecik çarpışması ihtimalinin artırılmasına yönelik birçok çalışma yapılmaktadır. Bu sayede hidrofobik taneciklerin koparılma seviyesi azalmaktadır. Böylece kabarcık boyutu ile tanecik boyutu arasında optimum bir oran elde edilmektedir. Gerçek mineral toplama miktarının hava kabarcığı tanecik çarpışmasına ve yapışmasına bağlı olmasına rağmen, genel flotasyon performansı ayırmanın gerçekleştiği köpük fazına bağlıdır (Gouri Charan, 2016)

Kolon flotasyonu çoklu temizleme safhaları içeren uygulamalar için kısmen daha uygundur ve çok aşamalı temizleme yapılan klasik flatasyon hücrelerinin aksine tek bir kolonda işlemler tamamlanabilmektedir. Bunun sonucu olarak daha kolay ve daha rahat kontrol edilebilir devreler elde edilmektedir. Kolonun kendisi önemli bir biçimde bilgisayar kontrolüne uygundur (Rao ve Gouricharan, 2016).

Kolon flotasyonunun ince kömürlerin temizlenmesi için oldukça etkili olduğu ve klasik flotasyondan daha başarılı olduğunu gösteren birçok çalışma yapılmıştır. Kolon flotasyonu geliştirilmiş seçiciliği yüksek kalitede temiz kömür üretimini mümkün kılmaktadır. Kabarcık üreten mekanizmaların farklı olduğu çok çeşitli flotasyon kolonları

vardır, bunların kömür kükürtsüzleştirme performansları arasında çok fazla fark bulunmamaktadır (Kawatra ve Eisele, 2000).

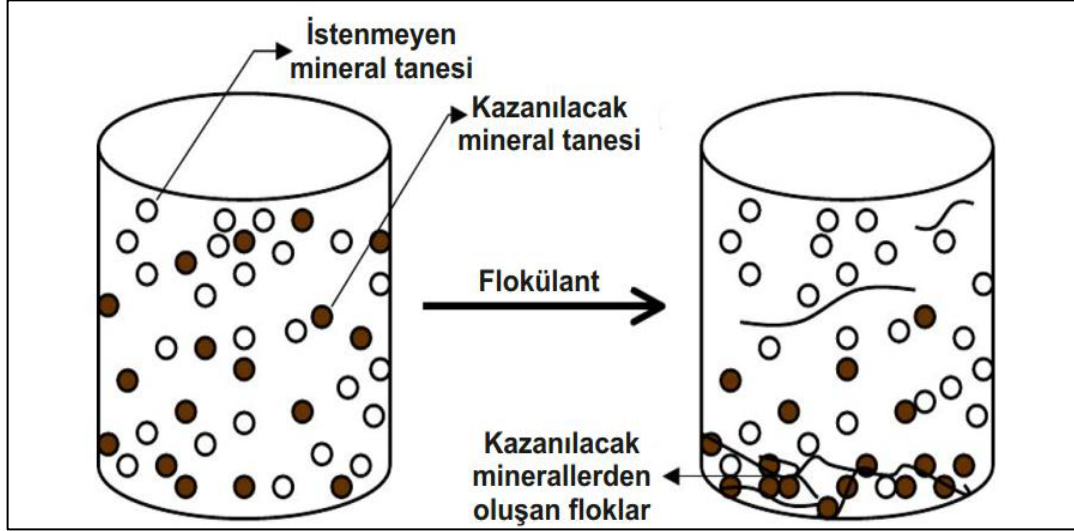


Şekil 1.15. Kolon flotasyonunun şematik görünümü (Rao ve Gouricharan, 2016).

Kolonlar, klasik flotasyon hücrelerinden daha derin köpük bölgesi olmasından dolayı ve yukarı doğru hareket eden köpükte bulunan hidrofilik minerallerin miktarını düşürmek için kullanılan yıkama suyunun bulunmasından dolayı daha iyi bir temizleme sağlamaktadırlar. Patil vd. (2010) yüksek verimde düşük küllü temiz kömür elde etmek için yüksek köpük bölgesine sahip kolonların göreceli olarak daha sığ bir pülp bölgesine ihtiyaç duyduklarını tespit etmişlerdir. İstenilen tenör ile geri kazanım arasındaki göreceli denge, besleme girişinin yerinin köpük bölgesine göre ayarlanmasıyla başarılabilir (Gouri Charan, 2016).

#### 1.7.4. Flokülasyon

Flokülasyon işlemi Şekil 1.16’da görüldüğü gibi doğal ya da sentetik yüksek molekül ağırlıklı organik polimerler kullanılarak seçimli olarak istenilen tanelerin bir araya getirerek salkımlaşırma işlemiyle çöktürülmesidir (Panda vd., 2010). Flokülasyonda kullanılan doğal flokülantlar reçine, nişasta, bitki ve sebze tohumlarından elde edilen doğal organik maddelerdir. Fakat, doğal flokülantlar sentetik flokülantlara nazaran daha zayıf flokülasyon yeteneğine sahip ve daha düşük molekül ağırlıklıdır. Sentetik flokülantlar ise katı, sıvı veya emülsiyon gibi üç farklı şekilde üretilebilmektedir. Anyonik, katyonik ve iyonik olmayan polimerler olarak üç gruba ayrılmaktadır (Demiral, 2013).



Şekil 1.16. Flokülasyon işleminin şematik gösterimi (Panda vd., 2010).

Flokülasyon işleminde flokülantın katı taneler üzerine adsorpsiyonu elektrostatik, hidrojen ve kovalent bağlarından biri veya birkaçı ile oluşmaktadır. Elektrostatik bağ ile katyonik veya anyonik polimerlerin kendisiyle zıt yüklü katı taneler arasında elektrostatik çekim kuvvetinin etkisiyle meydana gelen bağdır. Bu şekilde negatif yüzey yüklü tanecikler katyonik polimerlere bağlanabilirken pozitif yüklü tanecikler de anyonik polimerlerle bağlanabilirler.

Hidrojen bağı ile adsorplanma ise tane ve polimer arasında çok yüksek itme kuvvetinin olmadığı durumlarda non-iyonik polimerler ile taneler arasında oluşturulan bağlanma yöntemidir. Bu yöntemde bağlanma iki şekilde gerçekleşir. Birincisi, polimer yapısındaki



karbonil grubu (-C=O) ile mineral yüzeyindeki hidroksil (OH) grubu veya mineral yüzeyindeki su molekülleri ile kurulan bağıdır. İkincisi ise polimer yapısında bulunan amin grubundaki (-NH<sub>2</sub>) hidrojen ile mineral yüzeyindeki oksijen arasında kurulan hidrojen bağıdır.

Kovalent bağı ise polimer yapısındaki aktif gruplar ile mineral tane yüzeyindeki metal iyonları arasında oluşan bağıdır. Bu sayede anyonik polimerlerin negatif yüklü minerallerin yüzeyine adsorpsiyonu gerçekleşmiş olur (Öner, 2011).

Flokülasyon yöntemi, flotasyon yönteminin uygun olmadığı çok küçük tane boyutundaki kömürlerin temizlenmesinde literatürde kayda değer bir ilgi görmektedir. Genellikle yapılan çalışmalarda kömürdeki piritin uzaklaştırılmasından çok polimerik flokülantlar ile kül azaltma üzerine odaklanmış çalışmalar bulunmaktadır (Kawatra ve Eisele, 2001).

Kömürün seçimli flokülasyonu dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada kömür-mineral madde karışımı su içerisinde dağıtılmaktadır. Bu aşamanın amacı ortamdaki zayıf topakların parçalanmasıyla kömür ve mineral parçacıklarının ayrı taneler haline geldiğine emin olmaktır. İkinci aşama ise flokülantların kömür yüzeyine adsorplandığı flokülasyon aşamasıdır. Yüzeyine flokülant adsorplanan kömür taneleri birbiriyle çarpışarak bir araya gelirler. Bu işlem sonucunda flok çekirdekleri oluşur. Bu çekirdekler birbirleriyle ve diğer kömür parçacıklarıyla çarpışarak daha büyük flokları meydana getirirler. Bu floklar yeterince büyük hale geldiğinde, akışkan türbülansından doğan kesme kuvvetleri flokları tekrar küçük parçalar haline getirebilir. Seçimli flokülasyonda, flokülantların tek bir parçacık türüne kuvvetli bir biçimde adsorplanması ve diğer parçacık türlerine adsorplanmalarını istenmektedir. Kullanılan flokülant tipine bağlı olarak, seçimli bir şekilde ya kül yapıcı minerallerin ya da kömürün floküle edilmesi sağlanabilir. Bir sonraki aşamada floklar şartlandırılmaktadır. Bunun iki amacı vardır. Birincisinin amacı flokların sıkıştırılması ve bu sayede süspansiyondan uzaklaştırıldıklarında yeterli dayanıma sahip olmalarıdır. Flok şartlandırılmasının ikinci amacı ise sıkıştırma işlemi sırasında floklar içine hapsolmuş olan istenmeyen parçaların floklardan uzaklaştırılmasıdır. Son aşama ise flokların süspansiyondan ayrılmasıdır. Bu aşamada flokların parçalanmaması için süspansiyondan ayırma işleminin basit ve nazikçe yapılması gerekmektedir. Bu amaç için kullanılan yöntemler flotasyon, gravite dekantasyonu ve süzerek ayırmadır (Kawatra ve Eisele, 2001).

Kömürdeki kükürt azaltma işlemlerinde seçimli flokülasyonun en çok kullanıldığı alan çok ince pirit tanelerinin, ince öğütülmüş kömürden uzaklaştırılmasıdır. 10 µm'den daha büyük çapa sahip parçaların ayrılmasında bu yöntemin kullanılması pratik değildir. Bunun sebebi 10 µm'den daha büyük boyutlu parçacıkların sedimentasyon hızının, tanelerin flokülasyon hızından daha yüksek olduğu için işlem başarısının düşmesidir. Kömürün seçici flokülasyonunda polyvininyl alkol, polyethylene oksit, sodyum polystyrene sülfonate, polyethyleneimine, polydiallyldimethyl-amonyum klorit flokülant olarak kullanılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır (Kawatra ve Eisele, 2001).

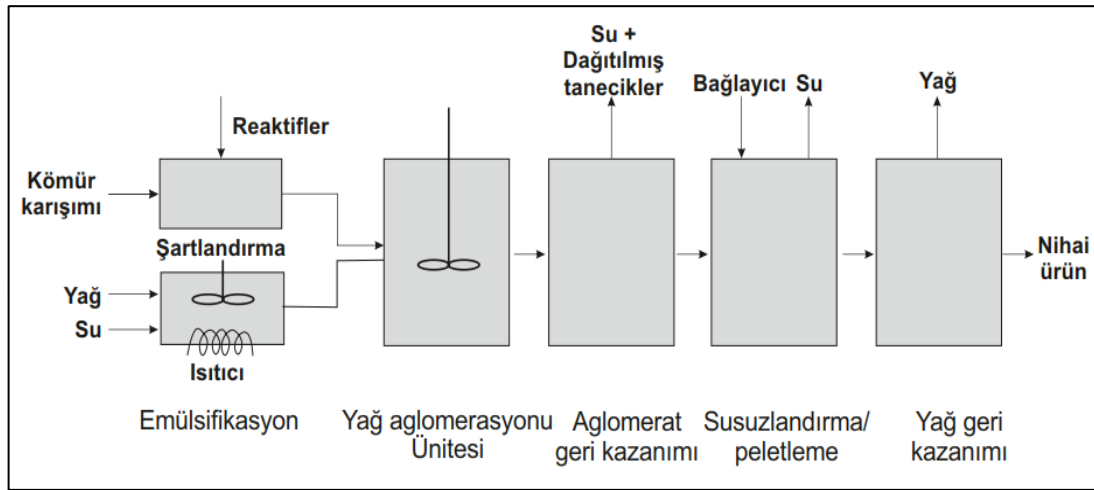
### 1.7.5. Yağ Aglomerasyonu

Aglomerasyon anlam olarak birleştirmek ya da bütünleştirmek manasına gelmektedir. Yağ aglomerasyonu su ortamı içinde dağılmış kömür tanecikleri, gang mineralleri ve yağ damlalarından oluşan bir sistemdir. Genel olarak bu sistem, kömür taneciklerinin seçimli olarak yağ tanecikleriyle bir araya gelmesiyle oluşan topakların sistemden kazanılması ve gang minerallerin su ortamında kalmasıyla tanımlanabilir. Yağ kaplı kömür tanecikleri, yeterli miktarda yağ ve mekanik karıştırma ile birbirleriyle çarpışarak yağın arayüzey gerilimi ve tanecikler arası yağ köprülerinin kapiler çekimi ile aglomeratları oluştururlar. Oluşan aglomeratlar farklı yöntemlerle (elekler ve flotasyon) kazanılarak temiz kömür elde edilmiş olur (Capes, vd., 1985; Theodore, 1985; Mehrotra vd., 1983).

Genel aglomerasyon akım şeması Şekil 1.17'de görüldüğü gibi beş işlem adımı içermektedir. Bunlar: (1) pülpün şartlandırılması; (2) yağın ısıtılması ve emülsifikasyonu; (3) pülp ve yağın karıştırılması ve yağ aglomerasyonu işleminin yapılması; (4) aglomeratların kazanımı; (5) susuzlandırma ve/veya peletlemedir. Bu akım şemasının sadece belli bir kısmının uygulanması ya da birkaç işlem adımının birleştirilmesi şeklinde de uygulanabilir. Belli durumlarda yağın kazanılması gibi işlem adımları da eklenebilir (Mehrotra vd., 1983).

Yağ aglomerasyonu uygulamalarında, pülpün şartlandırılması aşamasında parçacıkların yüzey özelliklerinin değiştirilmesi gerekebilir. Örneğin pirit parçacıklarının yüzeylerinin hidrofilik olması için kimyasallar eklenebilir. Daha ucuz olan ağır yağların kullanımının hafif yağların kullanımına göre eşit ya da daha iyi bir seçimlilik sağladığı belirlenmiştir. Aglomerasyon aşaması, yağ-su-kömür karışımında kömür tanelerinin yağ ile kaplanarak ve diğer kömür tanecikleriyle çarpışması ve birbirlerine yapışmalarıyla

aglomeratları oluşturdukları aşamadır. Aglomeratların kazanımı köpüğün alınması, eleklerle kazanım veya yüzen ve batan kısmın ayrılması şeklinde olmaktadır. Aglomeratların susuzlandırılması ya aglomeratların depolandıkları alanda doğal kurumaya bırakılmasıyla ya da eleme, titreşimli elekler veya santrifüj ayırıcıları ile yapılmaktadır (Mehrotra vd., 1983).



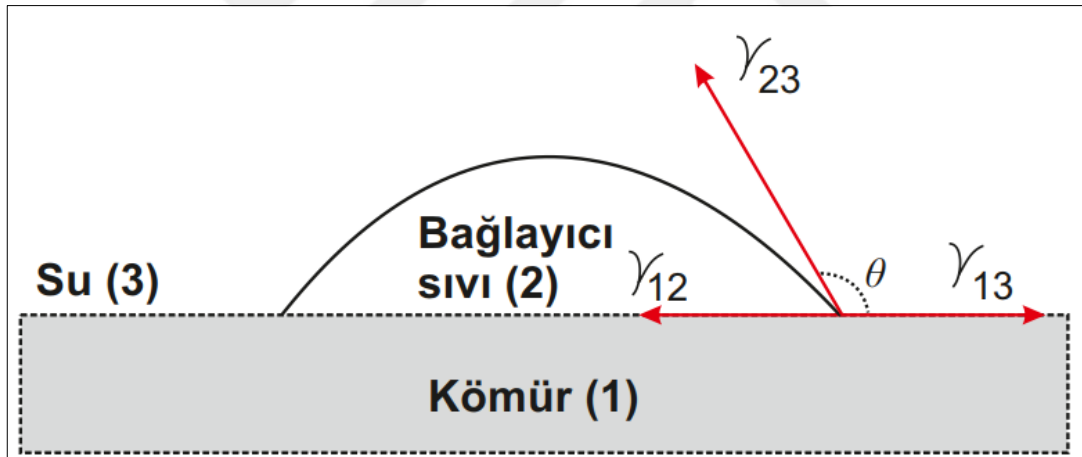
Şekil 1.17. Yağ aglomerasyonunun geliştirilmiş akım şeması

### 1.7.5.1. Yağ Aglomerasyonunun Teorisi

Termodinamik prensiplerine göre, yağ ile kaplanmayı ve kömür taneciklerinin aglomerasyonu sağlayan itici kuvvet, sistemin toplam yüzey enerjisindeki azalmadır. Yağ aglomerasyonu işleminin başarısı katı tanelerin ve yağın yüzey özelliklerine bağlıdır. Yağ aglomerasyonu, katı-su arayüzey enerjisi yüksek olması durumunda ya da katı-yağ arayüzey enerjisi düşük, yağ-su arayüzey enerjisinin yüksek olması durumunda en verimlidir. Antrasit ve bitümlü kömürler linyitlere göre daha yüksek katı-su arayüzey enerjisi ve daha düşük katı-yağ arayüzey enerjisine sahip olmasından dolayı daha iyi aglomere olurlar. Genel olarak, kömür taneleri, şeyl, kil ve jips gibi kül yapıcı hidrofilik minerallerinden yağ aglomerasyonu sayesinde ayrılırlar. Aynı zamanda genellikle hidrofobik olan pirit tanecikleri yağ aglomerasyonunda ince kömürlerle birlikte kazanılmaktadır. Ancak, uygun şartlandırma sayesinde pirit tanecikleri daha az hidrofobik hale getirilebilir ki bu sayede kükürt azaltma yöntemi olarak yağ aglomerasyonunun verimi artırılabilir (Mehrotra vd., 1983).

İşlem kinetiği açısından, mekanik karıştırma, işlem başarısını etkileyen en önemli faktördür. Mekanik karıştırma yağ kaplı kömür taneciklerinin bir araya getirilmesinde gereklidir. Öyle ki aglomerasyondan sorumlu olan kuvvetler etkin hale gelebilir. Mekanik karıştırmanın şiddeti ve kullanılan yağın miktarı aglomeratların oluşum hızını ve son boyutlarını belirlemektedir. Yüksek karıştırma hızı aglomeratları hızlı bir şekilde oluşturur ve tekrar dağıtma ile tekrar bir araya getirir ve bu tekrar oluşum, hidrofilik taneciklerin sistemden uzaklaştırılması şartıyla daha temiz aglomeratların oluşmasını sağlar. Ancak, yüksek karıştırma hızı aglomeratların nihai boyutunun küçük kalmasına sebep olmaktadır (Mehrotra vd., 1983).

Yağ aglomerasyonu teorisini, diğer bir ifadeyle kömür-yağ-su ortamındaki ıslanmayı, taneciklerin bir araya gelme mekanizmasını ve aglomerat oluşumunu farklı şekillerde açıklayan birçok teori vardır. Su ortamı içindeki katı taneciğin bağlayıcı bir sıvı (yağ) ile ıslanması şematik olarak Şekil 1.18’de gösterilmiştir.



Şekil 1.18. Yağın kömür yüzeyine yayılması (Özer vd., 2016).

Katı taneciği üzerindeki yağ damlacığının dağılması Eşitlik 1'deki yüzeyler arası gerilmeyle açıklanmaktadır.

$$\gamma_{13} = \gamma_{12} + \gamma_{23} \cdot \cos\theta$$

Burada;

$$\gamma_{12} = \text{Katı-yağ arayüzey gerilimi,}$$

$$\gamma_{13} = \text{Katı-su arayüzey gerilimi,}$$

$\gamma_{23}$  = Yağ-su arayüzey gerilimi,

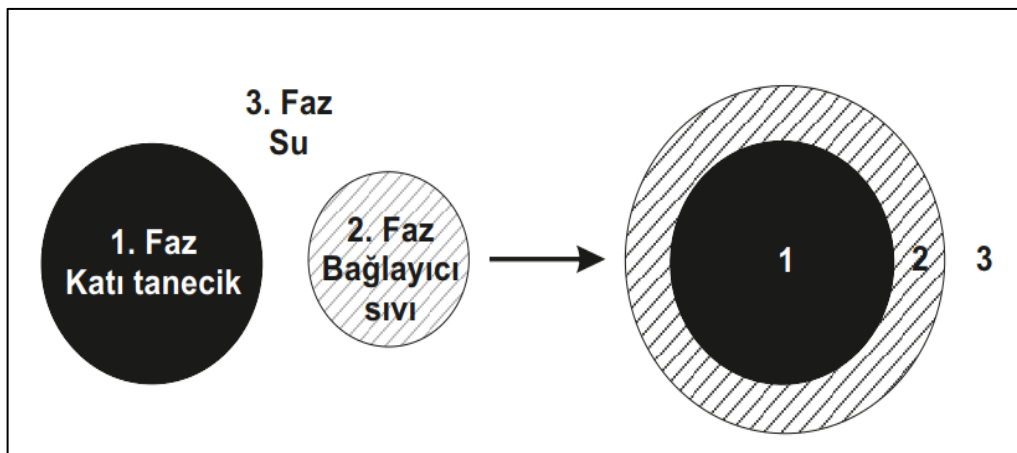
$\theta$  = Temas açısı, °'dir.

Şekil 1.18'de görülen  $\theta$  açısına bağlı olarak üç durum oluşabilir;

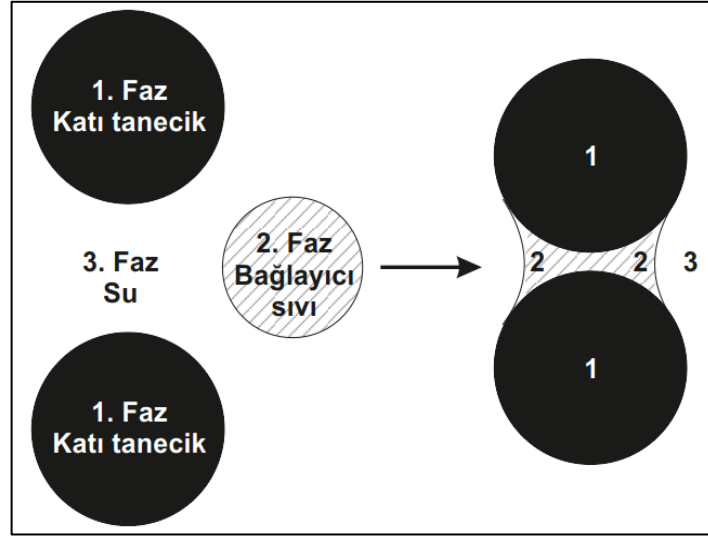
- ✓ 1. Durum:  $\theta < 90^\circ$  ise tane sulu faza geçme eğilimindedir,
- ✓ 2. Durum:  $\theta = 90^\circ$  ise tane yağ/su arayüzeyinde konsantre olma eğilimindedir,
- ✓ 3. Durum:  $\theta > 90^\circ$  ise tane yağ fazına geçme eğilimindedir (Puddington ve Sparks, 1975; Crozier, 1992).

Yağ aglomerasyonu 3. durum sağlandığında başarıya ulaşır. Bu koşulda su/yağ arayüzeyindeki tanelerin yağ fazına geçme eğilimi fazla olduğu için katı tanelerin yağ adsorpsiyonu artar. Diğer koşullarda ise tanelerin su fazında ve su/yağ arayüzeyinde kalma eğilimi daha yüksek olduğu için tanelerin yağ ile kaplanması temas alanına bağlı olarak gerçekleşir (Şimşek, 1999).

Jacques vd. (1979) termodinamiğin prensiplerini kullanarak katı taneciklerin bağlayıcı bir sıvı yardımı ile ıslanmasını ve bağlanmasını Şekil 1.19 ve Şekil 1.20'de görüldüğü gibi açıklamıştır. Bir taneciğin tamamen bağlayıcı bir sıvı ile kaplanmış olduğu ilk durum (Şekil 1.19) termodinamik açıdan  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$  bölgesinde duraylıdır. Bunun anlamı katı taneciklerin daha hidrofobik olmasıyla ve bağlayıcı yağ miktarının artmasıyla toplam ıslanma gerçekleşecektir. Diğer taraftan, iki katı taneciğin bir bağlayıcı sıvı damlası ile bağlandığı ikinci durumun (Şekil 1.20) olması daha olasıdır ve  $\theta < 90^\circ$  olduğu koşullarda termodinamik olarak çok daha duraylı köprüler oluşmaktadır. Bunun anlamı, katı taneciğin daha hidrofobik olması ve daha fazla bağlayıcı yağ miktarı ile köprülerin oluşmasının daha olası olduğudur.



Şekil 1.19. Yağ aglomerasyonunda birinci durumda faz dağılımı (Özer vd., 2016).



Şekil 1.20. Yağ aglomerasyonunda ikinci durumda faz dağılımı (Özer vd., 2016).

Organik fazda askıda kalmış hidrofilik katı taneciklerin olduğu durumda, su benzer şekilde hidrofilik tanecikleri bir araya getirecektir. Fakat kömürün heterojen yapısından ve çeşitli hidrofobik ve hidrofilik kuvvetli ve zayıf bölgelerden oluştuğundan dolayı, yağ aglomerasyonu işlemi sırasında bir miktar suyun aglomeratların içine hapsolmesi kaçınılmazdır (Laskowski ve Ralston, 1992; Yu, 1998).

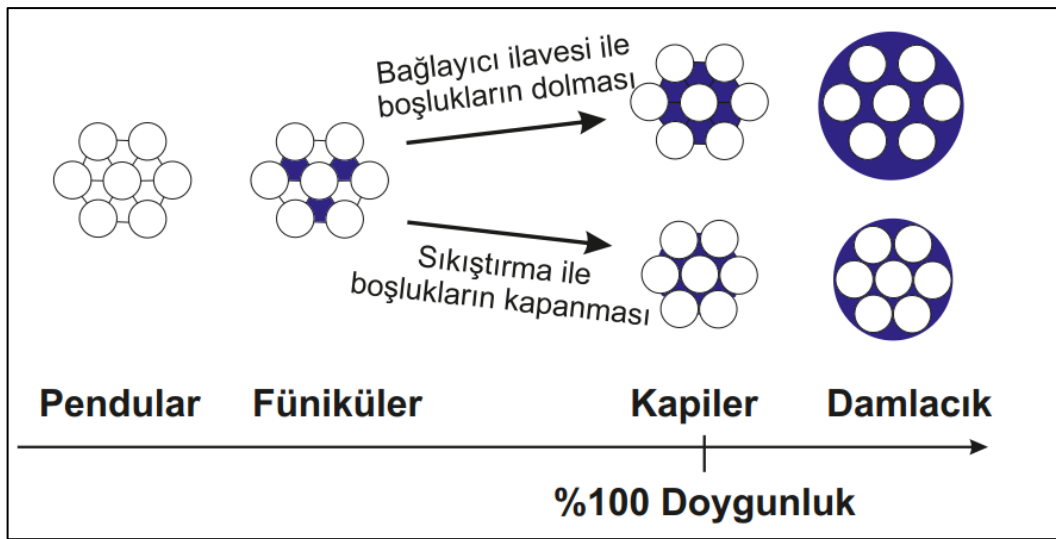
Capes, Germain ve Szymocha başka bir yağ aglomerasyonu mekanizması önermiştir. Bu mekanizmada, aglomerasyon işleminin ilk aşamasında yağ damlacıklarının başlangıçta kömür taneciklerine yapışmakta olduğunu ve bu süreç zarfında aglomerat oluşumunun gözlemlenmediğini varsaymışlardır. Pülpün şiddetli karıştırılması sonucunda aglomeratlar ince damlalar haline dönüşmektedir, bu damlalar hidrofobik tanecikler üzerinde bir film tabakası oluşturmaktadırlar. Bu hızlı büyüme aşamasına sebep olmaktadır ve yağ kaplı tanecikler arasında temas meydana gelmektedir, sonuç olarak pendular floklar oluşmaktadır. Ancak bu mekanizmanın Laskowski (1992) tarafından incelenmesi sonucunda yağın ince bir film tabakası oluşturmasının termodinamik açıdan mümkün olmadığı tespit edilmiştir.

Keller ve Burry (1987), Capes ve Germain tarafından önerilen yağ aglomerasyonu mekanizmasının aksine kömür yüzeyinin organik madde, mineral madde, boşluklar içeren karmaşık yapısından dolayı su ile çok farklı temas açıları oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, yağın dağılması tanecik yüzeyi ve su molekülleri arasında hidrojen bağlarının olduğu bir bölge ile karşılaşılan kadar devam etmektedir. Böylece, kömürün hidrofobik kısımları arasında hidrokarbon sıvı köprüleri oluştuğunda, su hidrofilik minerallerin

bulunduğu kömür kısımlarına tutunacaktır. Good vd. (1994) de, Capes ve Germain'in önerdiği ince film mekanizmasına karşı çıkararak Keller ve Burry tarafından önerilen mekanizmaya benzer bir mekanizma önermiştir. Good vd. (1994), kaynamış nişastanın piriti, kömürün hidrofobik özelliklerini kaybettirmeden, daha hidrofilik yaptığını tespit etmişlerdir.

Diğer taraftan, Sastry ve Cross (1980) aglomerat oluşum mekanizmasından sorumlu fiziksel kuvvetleri şu şekilde belirtmiştir. İlk olarak, tanecikler arasındaki çekimden sorumlu olan kuvvetler Van der Waals, manyetik ve elektrostatik kuvvetler olarak sıralanmıştır. Diğer bir kuvvet ise taneciklerin şekilleri tarafından kontrol edilen tanecikler arası kenetlenme etkileridir. Son olarak da hidrofobik ya da hidrofilik taneciklerin yüzeyler arasındaki ve kapiler kuvvetlerin etkisinde bir araya gelmesidir. Öte yandan, Sastry ve Cross (1980) katı bir taneciği tamamen ıslatan bir sıvı varlığındaki ana fiziksel kuvvetin yüzeyler arası gerilmeden doğan tanecikler arası kapiler çekim olduğunu tespit etmiştir.

Aglomeratların yapısı önemlidir ve aglomerasyon işlemi sırasında kapiler kuvvetler, aglomeratların yapısal bütünlüğünü korumasında ve dayanıklı olmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Kapiler basınç, aglomeratların tanecikleri arası boşluk hacmindeki sıvı miktarından etkilenmektedir. Üç farklı sıvıya doyurma durumu önerilmiştir. Bunlar, Şekil 1.21'de görüldüğü gibi pendular, funikular ve kapiler durumlarıdır. Sıvı doyurması genellikle bağlayıcı miktarının artırılmasıyla ve/veya tanelerin sıkılaştırılmasıyla artmaktadır (Mort, 2005).



Şekil 1.21. Aglomeratların bağlayıcı sıvı ile doyurulmasıyla oluşan aglomerat yapıları (Özer vd., 2016).

### 1.7.5.2. Yağ Aglomerasyonuna Etki Eden Faktörler

Kömürün hidrofobisitesi linyitten antrasite doğru rankı arttıkça artmaktadır. Ancak antrasitin hidrofobisitesi yüzey alanının artmasıyla kısmen azalabilir. Garcia vd. (1998) üç farklı antrasit kullanarak kömür-yağ-su temas açısını heptan, rafine yağ ve petrol için ölçmüştür. Yaptıkları çalışmada antrasitlerin farklı hidrofobisiteleri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Carbini vd. (1992) yüksek hidrofobisiteli ve yüksek ranklı kömürlerin aglomerasyon performansının düşük hidrofobluğu olan ve düşük ranklı kömürlerden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Kömürün oksidasyonu, kömür yüzey karakteristiğini ve buna bağlı olarak kömürün flotasyon ve aglomerasyon kabiliyetini etkilemektedir (Arnold ve Aplan, 1989). Genel olarak, kömür oksidasyonu yüzeyde karboksil ve fenolik grupların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da yüzeyi hidrofilik yapan kutup noktalarının oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. (Fuerstenau vd., 1983; Arnold ve Aplan, 1989). Oksijen taşıyan fonksiyonel grupların varlığı, yalnızca kömür yüzeyine yağ damlacıklarının adsorpsiyonunu baskılamakla kalmayıp aynı zamanda kömür taneciklerinin yüzeyinin negatif yüklenmesini sağlamaktadır. Bu da fonksiyonel gruplar ile negatif yüklü damlacıklar arasındaki elektrostatik itmeyi arttırmaktadır. Bu nedenle, oksitli kömürlerin yüzeyine yağ damlacıklarının adsorplanması ve kömürün hidrofobisitesi önemli ölçüde azalmaktadır.

Yağ aglomerasyonunda, yağ türünün, yapısının ve miktarının işlem performansı üzerine etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yağın özellikleri (yoğunluk, viskozite ve fonksiyonel gruplar), aglomerasyon işleminin hızını ve verimini, kül azaltma oranını, aglomeratların mekanik dayanımını, şekli ve boyutunu ve son ürünün kapiler yapısını belirlemektedir (Özer vd., 2017). Düşük viskoziteli yağlar organik madde verimini arttırmaktadır. Ancak, yüksek viskoziteli yağlar pülp içinde yeterince dağılmadıkları için organik madde verimini arttırmazlar (Ünal ve Aktaş, 2001; Alonso vd., 2002; Cebeci, 2003). Mehrotra vd. (1980) viskoz yağların aglomeratlar içinde yüksek kül seviyelerine neden olduklarını bildirmişlerdir.

Düşük ranklı kömürler (alt-bitümlü ve linyitler) yüksek oksijen içerikleri ve yüzeylerinin hidrofilik özellikleri ile bilinirler. Capes vd. (1991) hafif yağların bitümlü kömürleri başarılı bir şekilde aglomere edebildiklerini ancak düşük ranklı kömürleri aglomere edemediklerini tespit etmişlerdir. Bu durumun sebebi olarak, hafif yağların düşük yoğunluğa ve viskoziteye sahip olmalarından dolayı kömür taneciklerini bir arada

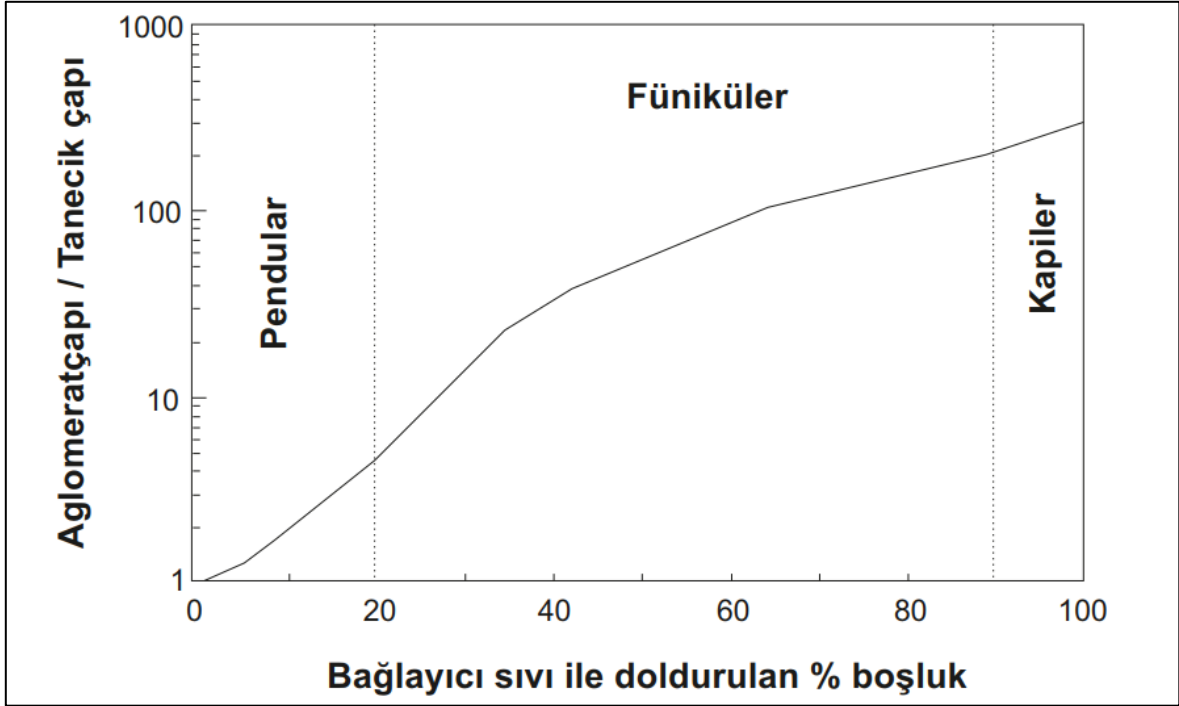


tutamamaları ve oluşan aglomeratların karıştırma sırasında parçalanarak elek açıklığından aşağıya geçmeleri gösterilebilir. Diğer yandan, Petela vd. (1995) yağ yoğunluğunun artmasıyla organik madde veriminin arttığını, kül ve kükürt azaltmanın düştüğünü bulmuşlardır. Ağır yağlar tipik olarak polar hidrofilik fonksiyonel gruplar (azot, oksijen ve kükürt) içermektedir. Bu fonksiyonel gruplar ağır yağların düşük ranklı kömürlerin hidrofilik yüzeylerin üzerine adsorbsiyonunu arttırmaktadır (Capes, 1976). Ancak polar grup içeren yağlar bitümlü kömür aglomerasyonunun seçimliliğini olumsuz etkilemektedir. Aromatik bileşikler yağ ve su arasındaki yüzeyler arası gerilimi düşürmektedir. Bu da yağ emülsifikasyonunu arttırarak aglomerat kazanımını arttırmaktadır.

Organik asitlerin trigliseritleri olarak sınıflandırılan bitkisel yağların özellikle de ince kömürlerin temizlenmesi için etkili bir bağlayıcı sıvı oldukları bildirilmektedir. Bu durum kömür taneleri ve yağ asitlerinin hidrojen bağıyla bir araya gelmeleri şeklinde açıklanabilir (Garcia vd., 1996; Alonso vd., 2002; Valdes ve Garcia, 2006). Yağ esterlerinin ve hidroksil gruplarının varlığı su içindeki yağ emülsifikasyonunu arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak bitkisel yağlar kullanıldığı zaman düşük kül içerikli aglomerat kazanımı artmaktadır. Mineral yağlardan farklı olarak bitkisel yağlar daha kolay temin edilebilir, çevre kirliliğine sebep olmaz, yenilenebilirdir ve neredeyse hiç kükürt, azot ve metal içermezler.

Bitkisel yağlardaki, serbest yağ asitleri veya aldehit grupları gibi hidrofilik oksijen içerikli kısımların kömürün yapısındaki oksijen grupları arasında bağlayıcı görevini gördüğü bildirilmiştir (Alonso vd., 1999).

Yağ aglomerasyonunda kullanılan yağ miktarı aglomeratların yapısını, aglomerat kazanımını ve seçimliliği çok önemli ölçüde etkilemektedir (Capes ve Germain, 1982; Capes ve Darcovich, 1984; Capes, vd., 1985; Steedman ve Krishnan, 1987; Petela, 1991). Şekil 1.22'de tanecikler arasındaki sıvı boşluğunun yağ ile doyurulmasıyla meydana gelen üç aşama görülmektedir. Çok düşük miktarda yağ eklenmesiyle, tanecikler arasına yüksek miktarda su hapsolmektedir ve gevşek floküle bir yapı meydana gelmektedir (pendular durum). Yağ miktarının artmasıyla beraber sistematik olarak tanecikler arasındaki su yağ ile yer değiştirmektedir (funikular durum). Funikular durumda daha lifli ve daha kompakt bir yapı meydana gelmektedir. Kapiler durum ise tanecikler arasındaki boşlukların tamamen yağ ile dolduğu durumda meydana gelmektedir. Bu durumda aglomeratlar küresel bir yapıdadır ve oldukça sağlamdır. Ayrıca meydana gelen aglomeratların su içeriği çok düşüktür. Kapiler bölgenin sonrasında aglomeratlar yapışkan yumrular şeklini almaktadır (Sadowski, 1998; Kılınç, 2000).



Şekil 1.22. Yağ miktarının artmasıyla oluşan aglomerat tipleri (Özer vd., 2016).

Karıştırmanın amacı yağın daha küçük yağ damlacıkları haline getirilmesi ve yağ ile kaplanan kömür taneciklerinin aglomerasyon için birbirleri arasında çarpışmasının sağlanmasıdır (Capes ve Germain, 1982; Coleman vd., 1995). Karıştırma hızı ve zamanı bu amacın gerçekleştirilmesi için gereklidir. Karıştırma hızı aglomeratların oluşum hızını etkiler, yüksek karıştırma hızları daha çok türbülansa, daha dengeli yağ dağılımına sebep olur, çarpışma sıklığını artırır ve aglomerasyon oluşum zamanını kısaltır. Aglomerasyon sırasında dalga kırınların kullanımı daha çok türbülansa sebep olur ve güç tüketimini azaltır (Yu, 1998). Bhattacharyya vd. (1977), düşük karıştırma hızlarında aglomerasyon kazanımı ve ürün kalitesinin aglomerasyon zamanıyla arttığını tespit etmiştir. Ancak yüksek karıştırma hızlarında aglomerasyon kazanımı ve ürün kalitesi artan aglomerasyon zamanıyla maksimum bir değere ulaşmıştır. Çeşitli araştırmacılar aglomerasyon kazanımının karıştırma hızıyla belirli bir kritik hız değerine kadar arttığını ancak bu değer üstündeki hız değerlerinde aglomerasyon veriminin düştüğünü tespit etmişlerdir (Gence, 2006; Cebeci ve Sönmez, 2006; Şahinoğlu ve Uslu, 2008; Aslan ve Ünal, 2011; Düzyol, 2015). Bu kritik hızda hem çarpışma olasılığı hem de yağ kaplanmış olan kömür taneciklerinin çarpışma enerjisi artmaktadır ve maksimum aglomerasyon verimi elde edilmektedir (Düzyol, 2015). Bu kritik değer üzerindeki karıştırma hızlarında, yüksek kesme ve dağıtma kuvvetlerinden

dolayı aglomerasyon kazanımının düştüğü görülmüştür (Cebeci ve Sönmez, 2002; Kumar vd., 2015). Chary ve Dastidar (2010) ve Şahinoğlu ve Uslu (2008) kritik hızın üstündeki karıştırma hızlarının aglomeratların kül ve kükürt içeriğini azaltmadığını bulmuşlardır.

Artan karıştırma süresi güçlü aglomeratların oluşumuna ve kazanımın artmasına neden olmaktadır (Cebeci vd., 2002; Cebeci ve Sönmez, 2006; Şahinoğlu ve Uslu, 2008; Chary ve Dastidar, 2010; Duzyol, 2015). Ancak artan karıştırma süresinin kül ve pritik kükürt uzaklaştırmayı düşürdüğü tespit edilmiştir. Çünkü artan karıştırma süresiyle pirit ve diğer inorganik maddeler aglomeratların içine hapsolmaktadır (Cebeci ve Sönmez, 2006; Şahinoğlu ve Uslu, 2008; Chary ve Dastidar, 2010). Düşük karıştırma hızlarındaki yüksek karıştırma sürelerinde aglomerat boyutlarının büyüdüğü görülmüştür (Kawashima vd., 1981; Bos ve Zuiderweg, 1985; Skarvelakis ve Antonini, 1995; Şahinoğlu ve Uslu, 2008). Bu da kül miktarının artmasına ve piritik kükürt uzaklaştırmının azalmasına sebebiyet vermektedir (Rao ve Vanangamudi, 1984; Cebeci vd., 2002; Chen vd., 2013; Duzyol, 2015). Ancak yüksek karıştırma hızlarındaki uzun aglomerasyon süreleri aglomeratların parçalanmasına sebep olmaktadır. Bu da düşük organik madde kazanımına, düşük kül içeriğine ve yüksek pritik kükürt uzaklaştırmaya neden olmaktadır.

Katı oranı, kömür tanecikleri ve yağ damlacıkları arasındaki itme ve çekme kuvvetlerini doğrudan etkilediği için aglomerasyon verimini de etkilemektedir. Çok yüksek ve çok düşük katı oranlarında, optimum katı oranına göre, yağ damlacıkları ile kömür taneciklerinin çarpışma sıklığı düştüğü için aglomerasyon verimi de düşmektedir (Bhattacharyya vd., 1977; Capes ve Germain, 1982; Rao vd., 1982; Osborne, 1988). Yüksek katı oranlarında (>%20) optimum katı oranındaki aglomerasyon verimine ulaşmak için aglomerasyon süresinin arttırılması gerekmektedir (Bhattacharyya vd., 1977; Rao vd., 1982). Rahmani (2001), yaptığı çalışmada düşük katı oranında (<%10) katı tanecikleri ile yağ damlacıklarının çarpışma miktarı düştüğü için işlem sonunda yağ damlacıklarıyla hiç karşılaşmadığı için etkilenmeden ortamdaki atıkla beraber giden kömür tanecikleri olduğunu bildirmiştir. Fakat sistemdeki tanecikler çok iyi dağıldığı için yöntemin seçimliliğinde ciddi bir artış gözlenmektedir. Normal katı oranlarında (%10-20) katı tanecikler ile yağ damlacıkları arasında optimum çarpışma gerçekleşir. Bu durumda optimum aglomerat kazanımı sağlanırken, yağ damlacıkları ile karşılaşmadan sistemi atık ile beraber terkeden kömür taneciği miktarı en aza inmiş olur (Temel vd., 2009; Chary ve Dastidar, 2012; Chen vd., 2013; Öztürk ve Temel, 2013).

Ortam pH'ı aglomerasyonu etkileyen parametrelerden bir diğeridir. pH'ın etkisi kömürün ve mineral maddenin zeta potansiyeline ek olarak, kömür tanecikleri ve yağ damlaları arasındaki itici enerji potansiyeli ölçümleri ile açıklanmaktadır. Nötr pH'da kömür tanecikleri ve yağ damlacıkları arasındaki itici kuvvetler minimumdur. Bu da kömür taneciklerinin yüzeyinin yağ filmiyle kaplanmasına sebep olur. Çeşitli çalışmalarda nötr pH'ın en yüksek aglomerasyon verimini sağladığı bildirilmiştir (Wheelock vd., 1994; Gürses vd., 1997; Cebeci vd., 2002; Gence, 2006; Temel vd., 2009; Chary ve Dastidar, 2013). Ancak, düşük pH'larda organik madde verimindeki düşüşün sebebi kömür yüzeyinin hidrofilik karakterinin ve pozitif yüklenen parçacıklar arasındaki itici kuvvetlerin artmasıyla açıklanabilir (Cebeci vd., 2002; Chary ve Dastidar, 2013). Yüksek pH'larda negatif yüklenmiş olan kömür tanecikleri veya aglomeratlar arasında itici kuvvetler bulunmaz. Çeşitli çalışmalarda asidik ortamdan alkali ortama geçişin aglomerasyon verimini arttırdığı bildirilmiştir, bunun sebebi olarak yüksek pH'larda kömürün hidrofobitesinin artması gösterilmektedir. Ancak, Şahinoğlu ve Uslu (2008) ve Ünal ve Erşan (2007) bunun tam tersi sonuçlara ulaşımlardır ve asidik ortamda alkali ortamdan daha iyi sonuçlara ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Kömür tane boyutu da aglomerasyonu etkileyen değişkenlerden biridir. Öğütme işlemi sırasındaki kömür tanecik boyutundaki azalma mineral maddelerin serbestleşmesini arttırmaktadır. Bu da safsızlıkların ve külün serbestleşmesine sebebiyet vermektedir (Bhattacharyya vd., 1977; McCracken ve Trass, 1994; Garcia vd., 1995; Chary ve Dastidar, 2013). Aglomerasyon işleminde ince taneciklerin aglomere olması büyük taneciklerden daha kolaydır. Ancak ince tanelerin varlığı, boşluklarda toplanma eğiliminde oldukları ve sonuç olarak tanecikler arası çekici kuvvetleri artırarak aralarındaki mesafeyi düşürdüklerinden dolayı büyük taneciklerin büyümesini sağlamaktadır (Pietsch, 1991). Şahinoğlu ve Uslu (2008) ince kömür tanelerinin kullanılmasının küçük ve daha temiz aglomeratların oluşmasına sebep olduğunu ve yağ miktarının ve kömür tane boyutunun aglomerat boyutunu önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir.

### **1.7.5.3. Yağ Aglomerasyonu Yönteminin Tarihçesi**

Yağ aglomerasyonu yöntemi ilk olarak 1920'lerde kömürün temizlenmesi için geliştirilmiştir. Yağ aglomerasyonu, pilot ve tesis ölçeğinde birçok yerde kullanılmıştır. Ancak geliştirilen proseslerin birçoğu yağ maliyetlerinin çok yüksek olmasından dolayı uzun

sürelili kullanılmamıştır. Sonuç olarak, işletme maliyetlerinin düşürülmesi amacı ile geliştirilen prosesler büyük değişikliklere uğramıştır (Kawatra ve Eisele, 2000).

#### a) Trent Prosesi

Trent prosesi kömürde uygulanan ilk yağ aglomerasyonu yöntemidir. Bu yöntemle çalışan ilk tesis Virginia'da 1922 yılında kurulmuş ve 1926 yılına kadar Benton, Newark, Spokane ve Toledo bölgelerine de benzer tesisler kurulmuştur. Bu tesislerin en büyüğü günlük 600 ton kapasite ile çalışmaktaydı. Tesiste, 0,149  $\mu\text{m}$  boyutunun altına öğütülmüş kömür %40 katı oranı ve %30 yağ (kuru kömür ağırlığı) oranı ile 150 dev/dk karıştırma hızı ile karıştırılmaktaydı. Aglomerasyon işlemi sonunda aglomeratlar 25 mm boyutunda ve %4 küllü olarak elde edilmiştir. Yüksek oranlarda fuel-oil kullanımı yöntemi ekonomik olmaktan uzaklaştırmıştır (Mehrotra vd., 1983).

#### b) Konvertol Prosesi

Bu yöntemle Trent prosesinde çok yüksek olan yağ tüketimi %3-10 seviyesine indirilmiştir. Ayrıca yağ ve kömürün karıştırılması için özel bir değirmen kullanılmıştır. Bu prosesin uygulandığı Batı Virginia bölgesindeki bir tesiste %80'i 0,074  $\mu\text{m}$  boyutundaki %40-45 katı oranı %10 yağ oranındaki işlemde %50 kül azaltma oranı ve %80 verimle temiz kömür kazanılmıştır. Prosesin bir diğer özelliği ise Trent prosesinden çok daha kısa süren karıştırma süresidir. Ayrıca işlemde kullanılan bağlayıcı sıvının %95'i geri kazanılmıştır. Yöntem pilot tesis ve ticari tesis olarak uygulanmasına rağmen toz problemi ve fuel-oil maliyetlerinden dolayı kullanımına son verilmiştir (Mehrotra vd., 1983).

#### c) NRCC Prosesi

Bu yöntem, küresel aglomerasyon yöntemi olarak 1960'ların başında sıvı karışımların içindeki birçok katı parçacıktan sadece bir çeşit katının kazanılmasını sağlayan bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Kömür atıkları içindeki kömürün kazanılması için potansiyel bir uygulamadır. Yöntem, diğer yağ aglomerasyonu yöntemleri gibi seçimli olarak kömürün yağlar ile kaplanarak kazanılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada kömür ve hafif yağlar yüksek hızlı bir karıştırıcı ile karıştırılıp

mikro-aglomeratlar elde edilmektedir. İlk işlemde hafif yağların kül azaltma oranı daha yüksek olmasından ve daha iyi dağılımlarından dolayı tercih edilmekteydi. Oluşan mikro-aglomeratlar, elekler ile kurutulduktan sonra ağır yağlar ile disk veya tamburlu peletleyicilerle 6-12 mm boyutlarında peletler elde edilmiştir. Bu yöntemde ilk aşamada %4 yağ oranı ile %90'nın üzerinde verim elde edilmiştir. Boyutları 6-12 mm arasındaki büyük peletlerde nem oranı %3-5 arasında değişirken 2 mm'nin altındaki peletlerin nem oranı %8-12 arasında değişmekteydi. Bu yöntem ticari olarak uygulanmamıştır (Mehrotra vd., 1983).

#### d) Shell Pelletizing Separator (SPS) Prosesi

SPS Prosesi, gazlaştırma prosesinin yıkama suyundaki ince tanecikleri uzaklaştırmak için Shell Research tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde ince boyutlu parçacıklar ile yağ karıştırılarak, 3-5 mm boyutlarında peletler üreten bir cihaz kullanılmaktadır. Sistemde ince boyutlu bir parçacığa karşılık beş kat yağ damlacığı bulunmaktadır ve bu karışım 10 dk karıştırılarak ortamdaki katı parçacıklar uzaklaştırılarak temiz su üretilmekteydi. Bu yöntemde işlem süresi arttıkça yağ sarfiyatı düşmektedir. Bu yöntemde temiz kömür elde etmek için %9-15 yağ oranı ve %20 katı oranıyla yapılan çalışmada %85-95 oranında kül azaltma ile %95 verimle temiz kömür elde edilmiştir (Mehrotra vd., 1983).

#### e) Olifloc Prosesi

Olifloc prosesinin amacı flotasyon, filtrasyon ve santrifüj işlemlerinin seçimliliğini ve performansını arttırmaktır. Bünyesinde yüksek miktarda kil bulunan kömürlerin flotasyon ve filtrasyon işlemleri çok zordur. Bu yöntem sayesinde kömürlerin şlamından ayrılması sağlanmaktadır. Bu yöntemin ilk aşamasında siklon üst akımından alınan malzeme %15-30 katı oranına getirilerek %8-10 gaz yağı veya hafif yağlarla ve yüksek hızlı karıştırıcılarla karıştırılarak elde edilen floklar, elek ve santrifüj ile susuzlandırılmaktadır. Bu yöntem iki tesiste uygulanmış ve hiçbir sorunla karşılaşılmamıştır. Fakat yağ fiyatlarındaki artışın yöntemin ticarileşmesini engellediği düşünülmektedir (Mehrotra vd., 1983).

#### f) CFRI prosesi

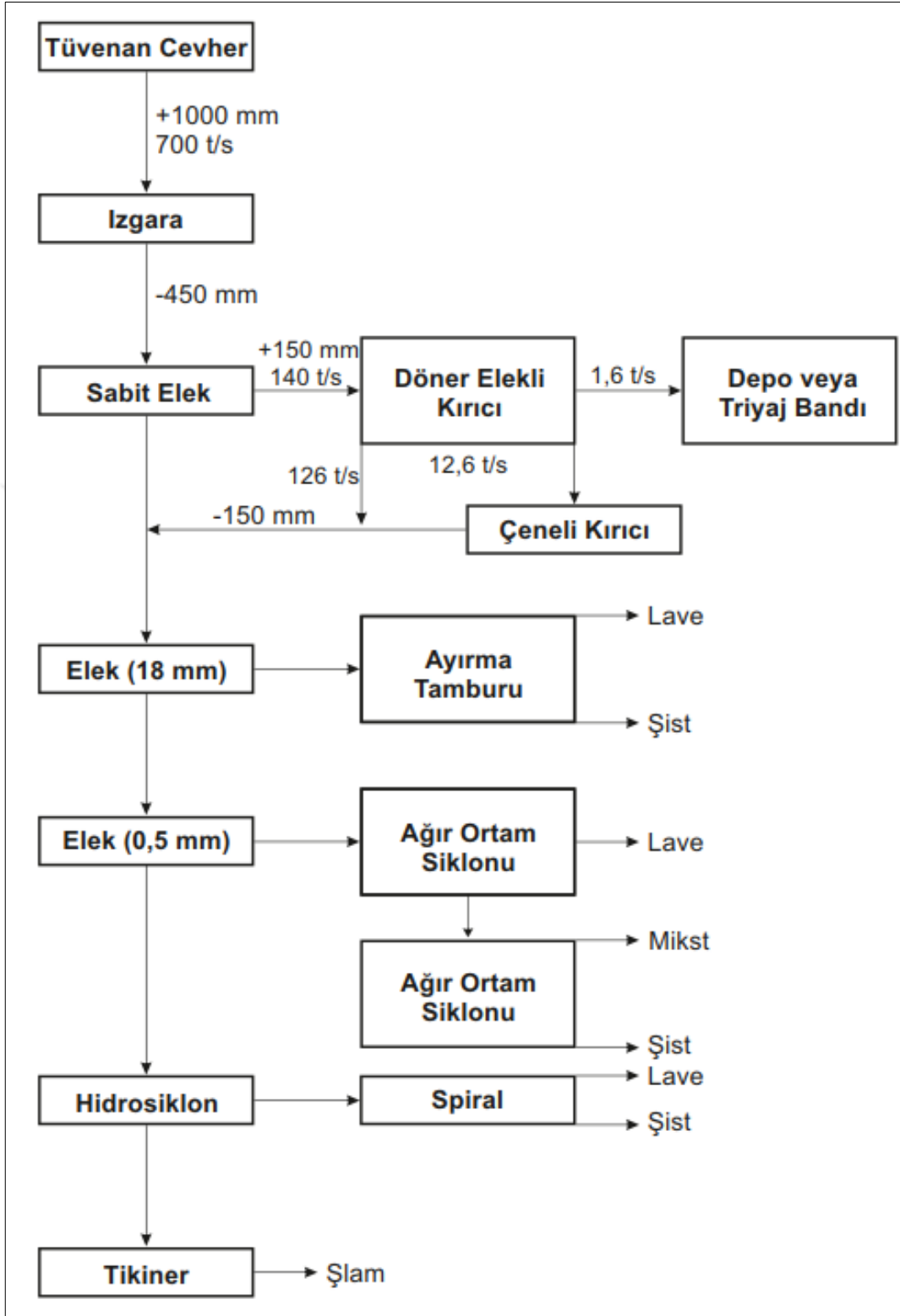
Bu yöntem, Hindistan'daki Merkezi Yakıt Araştırma Enstitüsü (CFRI) tarafından koklaşmayan ve yıkanması zor kömürlerin temizlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Yöntemde kömür kolloid değirmenlerde %2 mazot kullanılarak 1-2 dk karıştırılır ve sonrasında %8-12 oranında ağır yağlar ilave edilerek karıştırma işlemine devam edilir. İşlem bitiminde aglomeratlar titreşimli elek ile susuzlandırılır. Bu proses için en iyi katı oranı %15-20 arası olduğu tespit edilmiştir (Mehrotra vd., 1983).

#### g) Broken Hill Proprietary (BHP) prosesi

Bu yöntemin ana amacı diğer yöntemlerdeki yüksek enerji tüketimini düşürmektir. Bu nedenle, düşük vizkoziteli yağların kullanılması ve ağır yağlarında ön ısıtma işlemiyle kullanılması önerilmiştir. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla yağın sisteme verilmeden önce jet emülsifer ile emülsiye edilmesi gerektiği öne sürülmüştür. Bu yöntemde oluşan aglomeratlar elek üzerine alınarak kazanılmaktadır. Elek üzerine alınan aglomeratlar yüzeye bulaşan kül yapıcı minerallerinden uzaklaştırılması için fıskiye kullanılmıştır. Bu yöntemde %85-90 oranında kömür kazanmak için %8-15 oranında (ağırlıkça kuru kömür) yağ tüketimi olmaktadır (Mehrotra vd., 1983).

### 1.8. Tunçbilek Lavvarı ve Şlam Atıkları

Şekil 1.23'de gösterilen, yeraltı ve açık ocaktan çıkarılan tüvenan kömürün temizlendiği Tunçbilek lavvarı, her biri 350 ton/saat kapasiteli olan iki devreden oluşmaktadır, tesisin toplam kapasitesi 700 ton/saat'tir. Tesise 1000 mm'nin altında gelen tüvenan kömür 150 mm'nin altına indirilerek temizlenmektedir. Temizleme işleminin sonunda kömür piyasanın talep ettiği nem, kül, kalori ve boyut aralığına getirilmektedir. Lavvar, tüvenan kömür besleme, iri kömür devresi, ince kömür devresi, spiral devresi ve şlam devresi olmak üzere beş devreden oluşmaktadır.



Şekil 1.23. Tunçbilek lavvarının genel akım şeması (Uçar vd., 2017).

Şekil 1.23’de görüldüğü gibi 0-1000 mm boyutunda gelen tüvenan kömür 450x450 mm boyutundaki sabit ızgaraların üzerine dökülür. Izgaradan geçemeyen kömür iş



makinalarıyla kırılarak geçirilir. Izgara altına geçen tüvenan kömür bant sistemi ile 150 mm'lik sabit eleğe beslenir. Tüvenan kömürün elekten geçemeyen %20'lik kısmı döner elekli kırıcıya gönderilir. Döner elekli kırıcıda tüvenan kömürün %18'i 150 mm'nin altına kırılır, %1,8'i -300 +150 mm boyutu arasına kırılır ve %0,2'si de +300 mm boyutunda kalır. Tüvenan kömürün -300 +150 mm boyut arındaki bölümü çeneli kırıcıya beslenir, +300 mm olan bölümü ise taş stoğuna gönderilir. Taş stoğuna giden malzeme belli aralıklarla ayıklama bandına beslenerek elle ayıklanır. Tesisteki -150 mm boyutlu malzeme 18 mm açıklı tüvenan eleğine beslenir ve elek üstü iri kömür yıkama devresine beslenirken elek altı 0,5 mm eleğe beslenir. Eleğe beslenen malzemenin elek üstü ince yıkama devresine giderken elek altı hidrosiklona gönderilir. Hidrosiklonda üst akım (şlam) tükineye gönderilirken alt akım spiral devresine gönderilir. Tükineye giden şlam malzeme bir boru hattı ile birlikte atık barajına gönderilir (Şekil 1.24-26).

İri kömür devresi 1. ve 2. ağır ortam tambur devrelerinden oluşmaktadır. 1. ağır ortam tambur devresinde temizleme işlemi her biri 220 ton/saat kapasiteli iki adet Wemco ağır ortam ayırma tamburu ile yapılmaktadır. 1. devrenin batan ürünü 250 ton/saat kapasiteli 2. Wemco ağır ortam tamburuna beslenerek ara ürün (mikst) elde edilir. İnce kömür devresi 1. ve 2. ağır sıvı siklonu ve spiral devresi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. 1. ağır sıvı siklonunda -18 +0,5 mm boyutlu tüvenan kömür temizlenir. 1. ağır sıvı siklonunun batan bölümü 2. Ağır sıvı siklonunda tekrar temizlenerek ara ürün (mikst) elde edilir. -0,5 +0,1 mm boyutundaki tüvenan kömürde spiral devresinde temizlenir (Uçar vd., 2017).



Şekil 1.24. Tunçbilek lavvarı şlam tükineri



Şekil 1.25. Tunçbilek tikinerinden atık barajına giden boru hattı



Şekil 1.26. Tunçbilek lavvar atık barajından görüntüler (Fotoğraflar: Tuncay USLU ve Özüm YAŞAR)

### 1.9. Lavvar Atıklarından Kömür Kazanımına Dair Yapılan Çalışmalar

Lavvarda oluşan atıkların içinde kayda değer oranda kömür bulunmaktadır. Günden güne biriken bu atıklar kömürün çok önemli bir enerji kaynağı olmasından dolayı birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Atıkların içindeki kömürün geri kazanılması için yapılan çalışmalarda farklı yöntem ve ekipmanlar kullanılmıştır.

Lavvar atıklarından kömürün geri kazanılması için Karaoğlu (1999), Engin (2002) ve Erdem vd. (2010) sallantılı masa ve MGS cihazını ayrı ayrı ve Çiçek vd. (2008) aynı cihazları birlikte kullanmışlardır. Karaoğlu (1999), %49 kül içerikli TKİ Alpagut-Dodurga işletmesi lavvar atıklarının -3 +0,6 mm ve -0,6 +0,3 mm'lik boyutlu kısmını sallantılı masa ile zenginleştirmiş ve sırası ile %25 küllü malzemeden %13 küllü temiz kömür ve %32 küllü malzemeden %16 küllü temiz kömür elde edilmiştir. Malzemenin -0,3 +0,15 mm ve -0,15 +0,05 mm'lik boyutlu kısmı MGS ile zenginleştirilmiş ve sırasıyla %36 küllü malzemeden %20 küllü temiz kömür ve %44 küllü malzemeden %25 küllü temiz kömür elde edilmiştir. Engin (2002) Soma bölgesi lavvar atıklarının -3 +0,2 mm boyutları arasını sallantılı masa ile temizlemiştir ve %35 küllü malzemeden %49 verimle %13 küllü temiz kömür elde etmişlerdir. Ayrıca -0,2 mm boyutundaki %41 küllü malzemeyi MGS ile %62 verimle temizleyerek %22 küllü temiz kömür elde etmişlerdir. Erdem vd. (2010) ise Tunçbilek lavvar atıklarının temizlenmesini araştırmışlardır. Atık malzeme +500 µm, -500 +300 µm, -300 µm +38 µm ve -38 µm olmak üzere 4 boyut aralığı ayrılmış ve 500 µm üzeri malzeme sallantılı masa ile temizlemiş, -500 +300 µm, -300 µm +38 µm boyutlu malzeme MGS ile temizlemiş ve 38 µm altı malzeme yapılan deneylerde kullanılmamıştır. Sallantılı masa kullanıldığı deneylerde %78 organik madde verimi ile %22 küllü 5330 kcal/kg ısıl değerli temiz kömür elde edilmiştir. MGS kullanılan deneylerde de -500 +300 µm boyutlu malzeme %85 organik madde verimi ile %28 küllü 5064 kcal/kg ısıl değerli ve -300 µm +38 µm boyutlu malzeme %83 organik malzeme verimi ile %22 küllü 5602 kcal/kg ısıl değerli temiz kömür elde edilmiştir. Çiçek vd. (2008) çalışmalarında Manisa Soma'dan lavvar atıklarınının gravite yöntemleri kullanarak geri kazanımını amaçlamışlardır. Lavvar tesis atıklarından şlam atma işlemi sonrasında %36 küllü kömürden sallantılı masa ve MGS kullanarak %80 verim, %96 organik madde verimi ile temiz kömür kazanmışlardır.

Yine benzer şekilde Altun ve Hiçyılmaz (2001) TKİ'ye bağlı Çorum- Alpagut Kömür İşletmesi lavvarının ince boyut siklonu, iri boyut siklonu ve tikinerinden aldıkları şlam numunelerinin sallantılı masa ve Humphrey Spirali ile ayrı ayrı temizlenmesini



araştırmışlardır. İri boyut siklonundan, ince boyut siklonundan ve tikinerden sırasıyla %32, %36 ve %53 küllü alınan numuneler, humprey spirali ile temizlendiğinde de sırasıyla %25, %28 ve %49 küllü konsantreler, sallantılı masa ile temizlendiğinde sırasıyla %22, %25 ve %51 küllü konsantreler elde edilmiştir.

Oruç (2006), Can vd. (2010) ve Kantarcı (2009) lavvar atıklarının Falcon konsantratörü ile temizlenebilirliğini araştırmışlardır. Oruç (2009) Tunçbilek lavvar atıklarının 2 aşamalı ön zenginleştirmeye tabii tutuktan sonra Falcon konsantratörü ile temizlemiştir. Lavvardan alınan %66 küllü atık kömür hidrosiklon ile 2 aşamalı ön zenginleştirilme işleminden sonra %74 verim ile %45 küllü olarak elde edilmiştir. Falcon konsantratörü ile yapılan temizleme sonucunda %87 kömür kazanma verimi ile %40 küllü temiz kömür kazanılmıştır. Can vd. (2010) Tunçbilek lavvar atıklarında ki ince boyutlu kömürlerin kazanılmasını araştırmışlardır. Bu çalışmada %66 kül içerikli ve 1835 kcal/kg ısı değerli atık kömürü MGS ve Falcon konsantratörü ile ayrı ayrı temizlenmiştir. Falcon konsantratörü ile yapılan çalışmalar sonucunda %65 verimle %40 küllü ve 4224 kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde edilirken, MGS kullanıldığı zaman %49 verimle %23 küllü 5696 kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde edilmiştir. Kantarcı (2009), Ege Linyit İşletmesi Soma Bölgesi lavvar atığı ve Zonguldak bölgesi tüvenan kömürün Falcon konsantratörü ile temizlenmesini çalışmışlardır. Lavvar atığı kullandıkları deneylerde 4 farklı boyut aralığında kül oranları %56-64 arasında değişen malzemeleri kullanmışlardır. Bu deneylerde %58 yanabilir verim ve %56 kül uzaklaştırma oranı ile %48 küllü kömür elde etmişlerdir. Zonguldak bölgesine ait tüvenan kömür kullandıkları deneylerde %38 küllü kömürden %95 yanabilir verim ile %30 küllü kömür elde etmişlerdir.

Honaker ve Nombe (2005), Sabah ve Koltka (2014) lavvar atıklarının Knelson konsantratörü ile geri kazanımını araştırmışlardır. Honaker ve Nombe (2005) yaptıkları çalışmada Knelson konsantratöründe en uygun koşullarda %18 küllü kömürden %80 verimle %8 küllü temiz kömür kazanmışlardır. Sabah ve Koltka (2014) ise %59 küllü Ege Linyit İşletmeleri (ELİ) Soma lavvar atıklarını ilk başta hidrosiklona besleyerek kil ve karbonatlı minerallerinden %38 verimle ayrılarak %43 küllü kömür elde edilmiştir. Daha sonra Knelson konsantratörü ile %20 ayırma etkinliğiyle %31 küllü 4259kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde edilmiştir.

Chaurasia ve Nikkam (2016), Erdem vd. (2012), Özgen vd. (2009) MGS ile Özgen vd. (2011) MGS ve hidrosiklon kullanarak ve Özgen ve Sezgin (2014) yalnızca hidrosiklon kullanarak lavvar atıklarından kömür kazanım olanaklarını araştırmışlardır. Chaurasia ve

Nikkam (2016) %33 küllü atık kömürden %69 verimle %16 küllü temiz kömür üretmişlerdir. Erdem vd. (2012) Ömerler Lavvarının tikinerinden alınan atık kömürü -1 mm +0,500 mm, -0,500 mm +0,280, -0,280 mm +0,020 mm, -0,020 mm olmak üzere 4 boyuta ayırmışlardır. Malzemenin -1 mm +0,500 mm boyut aralığı 4168-4946 kcal/kg ısı değer ve %31 kül oranıyla temiz kömür olarak ayrılmış. Ayrıca, -0,020 mm boyutu da deneysel çalışmalarda kullanılmamıştır. MGS ile temizlenerek -0,500 mm + 0,280 mm boyut aralığı 5918 kcal/kg ısı değer ile %80 yanabilir verim ile %19 küllü olarak ve 0,280 mm +0,020 mm'lik kısmı 6004 kcal/kg ısı değer ile %80 yanabilir verim ile %19 küllü olarak kazanılmıştır. Özgen vd. (2009) ise %28 küllü Çatalağzı lavvarı ince taşkömürü atıklarının hidrosiklon ve MGS ayırıcısı ile 2 aşamalı zenginleştirilerek %62 verimle %7 küllü temiz kömür kazanmışlardır. İlk aşamada kil minerallerini uzaklaştırmak için hidrosiklon kullanılarak %28 küllü kömürden %57 verimle %20 küllü taş kömürü elde edilmiştir. Hidrosiklon alt akımından alınan konsantre MGS kullanarak temizlenmiş ve %62 verimle %7 küllü temiz kömür elde edilmiştir. Özgen vd. (2011) MGS ile %66 küllü Tunçbilek atık kömürünü %49 verimle %23 küllü temiz kömür olarak, %53 küllü Soma atık kömürünü %60 verimle %23 küllü temiz kömür olarak kazanmışlardır. Özgen ve Sezgin (2014) %75,9 kül içerikli Tunçbilek atık kömüründen %31,3 küllü temiz kömürü %66,7 verimle ve %60,1 küllü Soma atık kömüründen %29,7 küllü temiz kömürü %73,9 verimle kazanmışlardır.

Barraza vd. (2013), Vapur vd. (2010), Yılmazel (2010), Sis (2004) ve Alonso (2000) lavvar atıklarının flotasyon yöntemiyle geri kazanımını araştırmışlardır. Barraza vd. (2013) Kolombiya'daki %58 küllü lavvar atığından %92 organik malzeme verimi, %79 ayırma etkinliği ile %20 küllü temiz kömür elde etmişlerdir. Vapur vd. (2010) Ömerler lavvarının %33 küllü ara ürününden %94,8 yanabilir verim ile %17,9 küllü temiz kömür kazanmışlardır. Yılmazel (2010), Çatalağzı lavvarının %47 küllü 4091 kcal/kg ısı değerli atığından %98 yanabilir verim ile %18 küllü ve 6450 kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde etmişlerdir. Sis vd. (2004) Zonguldak lavvarının %46 küllü atığından iyonik bazlı toplayıcılar ile %13 küllü temiz kömür elde etmişlerdir. Alonso vd. (2000) %69 küllü ve 2213 kcal/kg ısı değerli atık kömürden bitkisel yağları toplayıcı olarak kullanarak %28 küllü ve 5953 kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde etmişlerdir.

Han vd. (2014) Brum vd. (2012) ve Türkkan (2006) kolon flotasyonu ile kömür atıklarının geri kazanımını araştırmışlardır. Han vd. (2014) Güney Kore'deki Hwa-Sun kömür madeninin lavvar atıklarından flotasyon yöntemiyle %70 verim %70 kül uzaklaştırma oranı ve %42 ayırma etkinliği ile temiz kömür elde ederken, kolon flotasyonu ile %85

yanabilir verim, %81 kül uzaklaştırma oranı ve %62 ayırma etkinliği ile temiz kömür elde edildiğini belirtmişlerdir. Brum vd. (2012) Brezilya'daki %65 kül içerikli atık kömürlerden %40 verimle %35 küllü temiz kömür elde etmişlerdir. Türkkkan (2006), Tunçbilek kömür yıkama tesisinin %42 küllü atıklarından %62 verimle %18 küllü 6400 kcal/kg ısı değerli temiz kömür elde etmiştir.

Asghari vd. (2018) ve Hanna ve Kalathur (1991) gravite ayırıcılarını ve flotasyon yöntemini ayrı fraksiyonlara ayırdıkları atık kömürlerin kazanılması için kullanmışlardır. Asghari vd. (2018) elekler vasıtasıyla farklı boyutlarda hazırlanan numunelerden en iri boyuttan en inceye doğru sırasıyla jig, sallantılı masa, spiral ve en ince boyut için flotasyon yöntemi kullanılarak %57,7 küllü atık kömürden %90'ın üstünde verimle %14'den daha az küllü temiz kömür kazanmışlardır. Hanna ve Kalathur (1991) ise Alabama bölgesindeki kömür atık barajlarındaki kömürlerin 0,149 µm boyutunun üstünü gravite yöntemleri ile kazanarak %8 kül ve %0,8 kükürt içerikli temiz kömür ve 0,149 µm boyutunun altını flotasyon ile kazanarak %10 kül ve %1,1 kükürt içerikli temiz kömür elde etmişlerdir.

### **1.10. Lavvar Atıklarından Aglomerasyon Yöntemi ile Kömür Kazanımına Dair Yapılmış Çalışmalar**

Yağ aglomerasyonu yöntemi ile kömür temizleme tesislerindeki atık kömürlerin kazanılması amacıyla Shrauti ve Arnold (1995), Alonso vd. (1999) ve (2002), Chary vd. (2015), Yadav ve Suresh (2016), Yadav vd. (2017), Wang vd. (2011) ve Valdes ve Garcia (2006) çeşitli çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak Alonso vd. (1999) üç farklı kömür yıkama tesis atığının ham ve rafine edilmiş ayçiçek ve soya yağını aglomerasyonda bağlayıcı olarak kullanarak %80 organik malzeme verimi ile termik santral için uygun özellikte malzeme elde etmişlerdir. Alonso vd. (2002) ise üç farklı kömür yıkama tesis atığının kolza yağı ile kazanılmasını araştırmışlardır. Kül içerikleri %69 ile %58 arasında değişen yüksek küllü atık kömürlerden %80 civarında kül azaltma oranı ile %23 küllü kömürü 6279 kcal/kg ısı değerli temiz kömür kazanmışlardır. Chary vd. (2015) Hindistan'ın Jharkhand bölgesindeki kömür yıkama tesis atıklarının bitkisel bir yağ olan karanja yağı ile kazanılmasını çalışmışlardır. Kömür yıkama tesisinden elde edilen %50'nin üzerinde küllü kömürden %78 organik madde verimi ve %51 kül azaltma oranı ile temiz kömür elde etmişlerdir. Shrauti ve Arnold (1995) yaptıkları çalışmada kömür yıkama tesisinde tikiner alt akımından aldıkları kömürün mineral

maddelerden ayırmak için dizel yağ kullanarak aglomerasyon yapmışlardır. Yapılan çalışmaların sonunda %80 kül azaltma ve yanabilir verim ile temiz kömür elde edilmiştir. Yadav ve Suresh (2016) Hindistan Jamadoba kömür yıkama tesisinden aldıkları kömür atıklarının soya yağı, hint yağı, karanja yağı, keten tohumu yağı gibi yağları kullanarak geri kazanımını araştırmışlardır. En iyi sonuçlar %98 organik madde verimi ve %64 kül azaltma oranı ile keten tohumu yağı kullanıldığı zaman elde edilmiştir. Yadav vd. (2017)'de ise aynı bölgeden elde ettikleri kömür yıkama tesis atıklarının bağlayıcı sıvı olarak atık trafo yağı kullanarak aglomerasyon yöntemiyle geri kazanılmasını çalışmışlardır. Kömür yıkama tesisinden alınan %34 küllü kömürden %96 organik madde verimi ve %63 kül azaltma oranı ile temiz kömür kazanılmıştır. Wang vd. (2011) Güneydoğu Çin bölgesinde kömür yıkama tesis atıklarının yağ aglomerasyonu yöntemiyle geri kazanılmasını araştırmışlardır. Yağ aglomerasyonu yönteminde ısıl işlem uyguladıkları yağların atık kömürün kazanılmasında etkinliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak %63 küllü atık kömürden %50'nin üzerinde organik malzeme verimi ve %70'in üzerinde kül uzaklaştırma oranı ile temiz kömür kazanmışlardır. Son olarak Valdes ve Garcia (2006) İspanya'daki iki farklı kömür yıkama tesis atıklarını iki farklı evden atık yağ olarak alınmış zeytinyağını ve Ayçiçek yağının bağlayıcı sıvı olarak kullanarak geri kazanmaya çalışmışlardır. Kül içerikleri %57 ve %64 olan iki kömür atığından sırasıyla %29 ve %30 kül içerikli, 5700 kcal/kg ve 5600 kcal/kg ısıl değerli temiz kömürler elde etmişlerdir.

### **1.10. Çalışmanın Özgün Değeri**

Lavvar atıklarından kömür kazanımında yağ aglomerasyonu yöntemini kullanan çalışmalarda yukarıda görüldüğü üzere büyük çoğunlukla bağlayıcı yağ olarak bitkisel ve petrol kökenli yağlar tercih edilmiştir. Bununla birlikte, bağlayıcı yağ aglomerasyon yönteminin en büyük maliyet kalemidir. Bu maliyetin ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi için atık yağların lavvar atıklarından kömür kazanımı amacıyla aglomerasyonda kullanılabilirliğinin araştırmasına yönelik sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmanın amaçlarından biri literatürdeki bu eksiği tamamlamaktır. Türk mutfaklarında yılda 1.500.000 ton bitkisel yağ kullanılmakta ve bu yağlardan yaklaşık 350.000 ton atık yağ açığa çıkmaktadır (Öztürk, 2004; Yaşar 2006; Dizge vd. 2007; Gezmiş vd. 2008;). Bu atık yağlar, biyodizel üretimi vb. amaçlarla toplanmaya çalışılsa da büyük çoğunluğu doğaya bırakılmakta, yasal olmayan kullanıma, kanalizasyona ve toprağa gitmektedir (Afacan,

2008). Toprağa, denizlere, nehirlere ulaşan atık yağlar gerek insan sağlığı, gerekse diğer canlılar açısından tehdit oluşturmaktadır. Bilimsel araştırmalar atık bitkisel yağların, su kirliliğinin %25 inden sorumlu olduğunu ortaya çıkarmıştır (Öztürk, 2004; Dizge vd. 2007; Gezmiş vd., 2008). Atık bitkisel yağlar lavvarlardan kömür kazanımında kullanıldığı takdirde ülkemiz ekonomisine katkı sağlanacak, çevresel bir problem çevresel avantaja dönüştürülebilecektir.

Farklı lavvarların atıkları, lavvara beslenen kömürlerin farklı olmasından dolayı kimyasal, minerolojik ve yapısal açıdan farklı olmakta ve kendine has özellik taşımaktadır. Bu sebeple her bir lavvar atığı, ilgili kömür kazanma-temizleme yöntemlerine farklı reaksiyon göstermektedir. Bu çalışmanın amaçlarından biri de Türkiye'deki en büyük kömür lavvarlarından biri olan Tunçbilek lavvarı şlam atıklarından kömürlerin aglomerasyon yöntemiyle kazanılabilirliğini araştırmaktır. Enerjide dışa bağımlılığı giderek artan ülkemizde tek yerli enerji kaynağı olan kömürün verimli ve israf edilmeden üretilip tüketilmesi gerekmektedir. Bu açıdan, lavvarlarda atıklar içine karışan ince kömürlerin kazanılması ülkemiz ekonomisi açısından önemlidir. Türkiye'deki lavvar atıklarından kömürlerin kazanımında farklı yöntemler denenmiş olmasına rağmen yağ aglomerasyonu yöntemi daha önce kullanılmamıştır.

Yağ aglomerasyonu yönteminin verimi ve elde edilen kömür kalitesini belirleyen en önemli aşamalarından biri aglomerat kazanımıdır. Lavvar atıklarından kömürün yağ aglomerasyonu ile kazanılması konusunda daha önce yapılan çalışmalarda aglomeratların kazanılması elek kullanılarak veya flotasyonla yapılmıştır. Bu çalışma dışında aglomerat kazanım yöntemleri olan eleme ve flotasyonun her ikisini de karşılaştırmalı olarak kullanan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

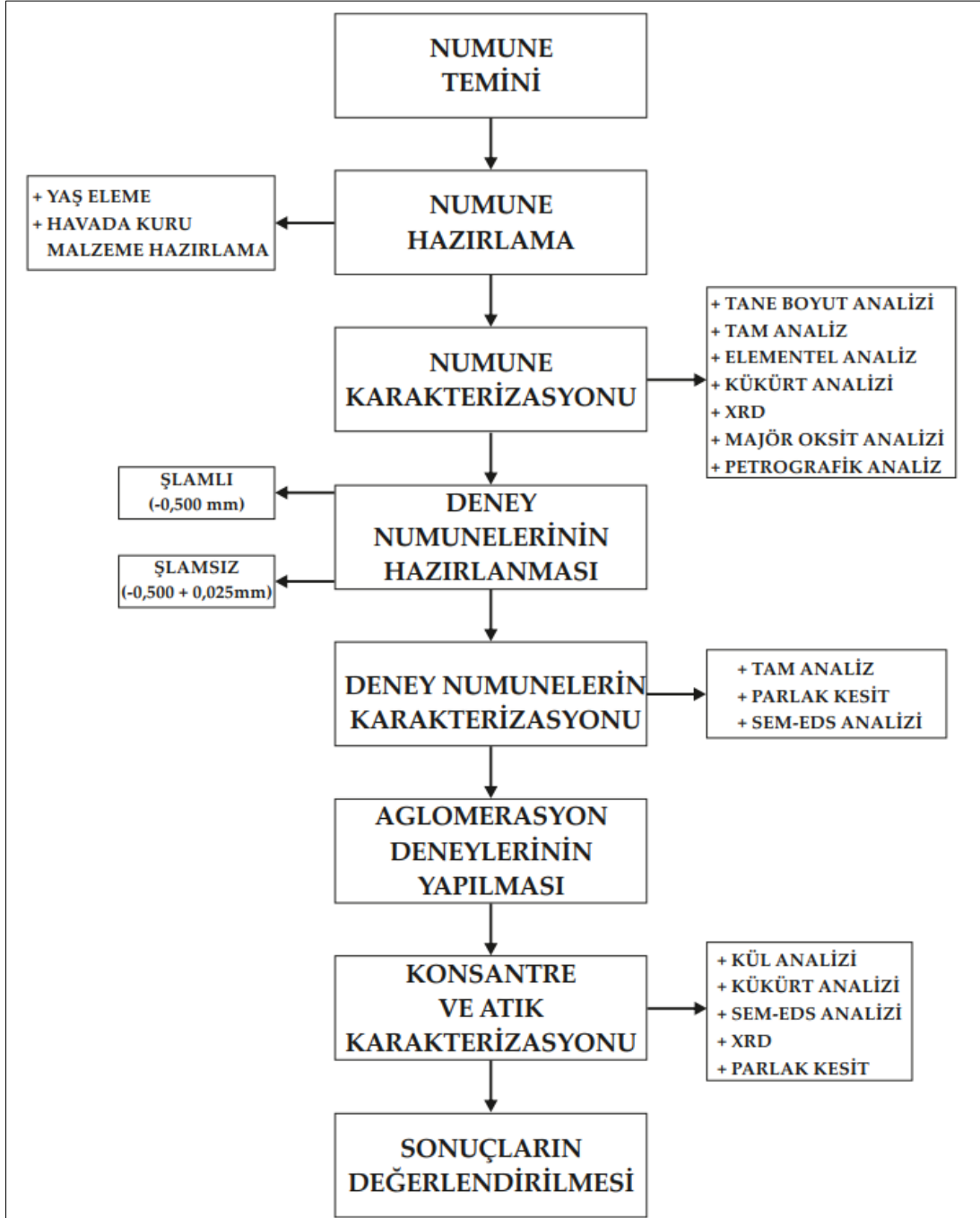
Kömürün yağ aglomerasyonunda performansı arttırmak amacıyla birkaç tane tuz kullanan sınırlı sayıda çalışma olsa da bu çalışma, çok daha fazla sayıda tuz çeşidinin karşılaştırılması olarak kullanması açısından da değerlidir. Aglomerasyon yönteminde bitkisel atık yağın emülsifikasyonu için sürfaktant kullanımına da daha önceki literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın bilimsel niteliği elde edilen deneysel veriler haricinde XRD, SEM-EDS, parlak kesit, TG-DSC, mikroskopik inceleme gibi, çok sayıda karakterizasyon yöntemi kullanılarak daha da arttırılmıştır.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında ilk olarak testlerde kullanılan lavvar atıklarından örnek alınarak karakterizasyonu yapılmış daha sonra da aglomerasyon testleri yapılmıştır. Elde edilen temiz kömürün gerekli analizleri yapılarak test sonuçları irdelenmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Yapılan çalışmalar

## 2.1. Örnek Temini

Bu çalışmada kullanılan örnekler Türkiye Kömür İşletmelerine (TKİ) bağlı Tunçbilek lavvarının tikinere giden hidrosiklon üst akımından temin edilmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi hidrosiklon üst akımı olan atıklar varillerde çöktürülerek biriktirilmiştir. Toplamda bir tonun üzerinde lavvar atığı laboratuvara getirilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Hidrosiklon (b) Tikiner (c) Hidrosiklondan alınan atık kömür (d) Laboratuvara götürülmek üzere hazırlanan atık kömürler.

## 2.2. Örneğin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Laboratuvara getirilen örnek yaş olarak altı farklı elek ile elenerek Tablo 2.1’de görüldüğü gibi yedi farklı boyut aralığına ayrılmış ve örneğin tane boyut analizi yapılmıştır (Şekil 2.3). Havada kuru hale getirilen örnek, bölücüler ile bölünüp paketlenerek analizler ve testler için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.3. (a) Numunelerin laboratuvara getirilmesi (b) yaş eleme

Tablo 2.1. Kömür tane boyut dağılımı ve bu dağılıma göre kül ve kükürt içerikleri (Havada Kuru)

Tane Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Miktar (%)	Kül (%)	Kükürt (%)
+500	37,14	33,45	2,66
-500 +250	12,07	53,49	2,73
-250 +125	5,62	51,72	5,28
-125 +75	2,55	43,51	3,08
-75 +38	3,98	52,76	1,53
-38 +25	2,31	60,95	0,29
-25	36,33	80,35	0,29

Örneğin karakterizasyonu için tam analiz (Nem, kül, uçucu madde miktarı, toplam kükürt, ısıl değer, külde kükürt ve hidrojen tayini), elementel analiz (C, H, N, S), pridik sülfat, organik kükürt analizleri, kömür külünde majör oksit analizi ve petrografik analiz Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü'nde (MTA) yapılmıştır. XRD analizleri, SEM-EDS analizi ise Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

Örneğin tam analizinde Leco marka TGA 701 model TGA cihazı, Leco marka AC 500 model kalorimetre cihazı, Leco marka SC144 model kükürt analiz cihazı kullanılmıştır. Elementel analiz ise Leco marka CHN-1000 model elementel analiz cihazında yapılmıştır. Tablo 2.2'de görüldüğü gibi lavvar atığı düşük ısıl değerli olup kül içeriği oldukça yüksektir.

Atığın kül içeriğinden görüleceği üzere çok yüksek miktarda inorganik safsızlıklar içermektedir.

Tablo 2.2. Tunçbilek atık kömür numunesinin tam analizi

<b>Tam Analiz</b>	<b>Havada Kuru Numune</b>	<b>Kuru Numune</b>
Toplam Nem (%)	6,15	-
Kül (%)	54,44	58,01
Uçucu Madde (%)	22,18	23,63
Külde Kükürt (%)	0,65	0,7
Toplam Kükürt (%)	1,64	1,75
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	2353	2545
Üst Isıl Değer (kcal/kg)	2501	2665

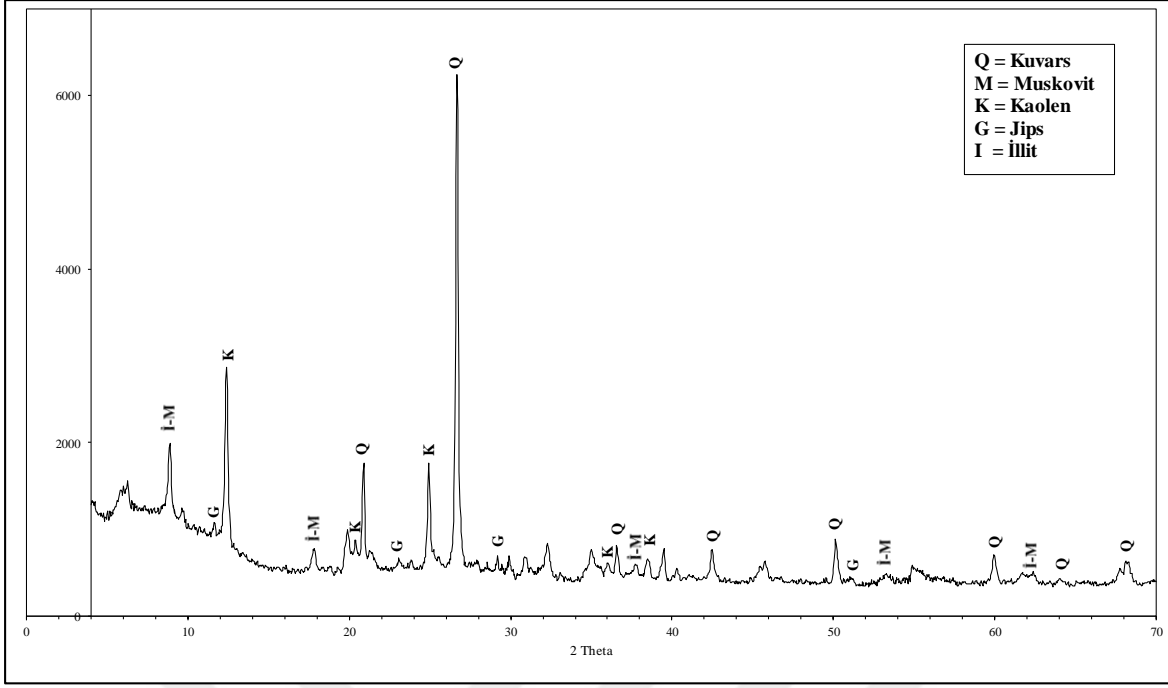
Tablo 2.3. Tunçbilek atık kömür numunesi elementel analizi

<b>Analiz Tipi</b>	<b>Havada Kuru Numune</b>	<b>Susuz Külsüz Numune</b>
Karbon (%)	29,23	71,45
Hidrojen (%)	2,24	5,47
Azot (%)	1,05	2,57
Oksijen (%)	7,36	18,00

Lavvar atıklarının kül oranının aksine kükürt oranının çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir (Tablo 2.4). XRD analizleri ile lavvar atığı örneğinde kuvars, kaolen, muskovit ve illit minerallerinin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.4). Pirit içeriğinin oransal olarak düşük olmasından dolayı XRD analiz grafiğinde gözükmemektedir.

Tablo 2.4. Tunçbilek atık kömürünün pridik, sülfat ve organik kükürt tayini

<b>Analiz Tipi</b>	<b>Orijinal Numune</b>
Pridik Kükürt (%)	1,01
Sülfat Kükürt (%)	0,34
Organik Kükürt (%)	0,29



Şekil 2.4. Tunçbilek lavvar atıklarının XRD analizi

Kömür külündeki majör oksitlerin analizi Thermo ARL marka XRF cihazı ile yapılmıştır. Tablo 2.5’de görüleceği üzere  $\text{SiO}_2$  oran olarak baskın oksittir. Örneğin petrografik analizi Leica DM4000 M mikroskopuyla yapılmış olup atıklardaki ana maseral gurubu hüminit olarak belirlenmiştir (Tablo 2.6).

Tablo 2.5. Tunçbilek lavvar atıklarının külünde majör oksit analizi

Majör Oksit	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	MnO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SO}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$
(%)	18,7	20,7	4,5	1,7	1,9	<0,1	0,8	0,2	4,2	44,0	0,6

Tablo 2.6. Tunçbilek lavvarı atık kömürünün petrografik analizi

Maseral Grupları (%)			Mineral Grupları (%)		Toplam
Hüminit Grubu	İnertinit Grubu	Liptinit Grubu	Pirit	Diğer Mineraller	
50	3	5	2	40	100

Tunçbilek lavvarından getirilen atık örneğinin içinde bulunan +500  $\mu\text{m}$  boyutundaki kısım malzeme uzaklaştırılmıştır ve deneylerde kullanılmamıştır. Deneysel çalışmalar için

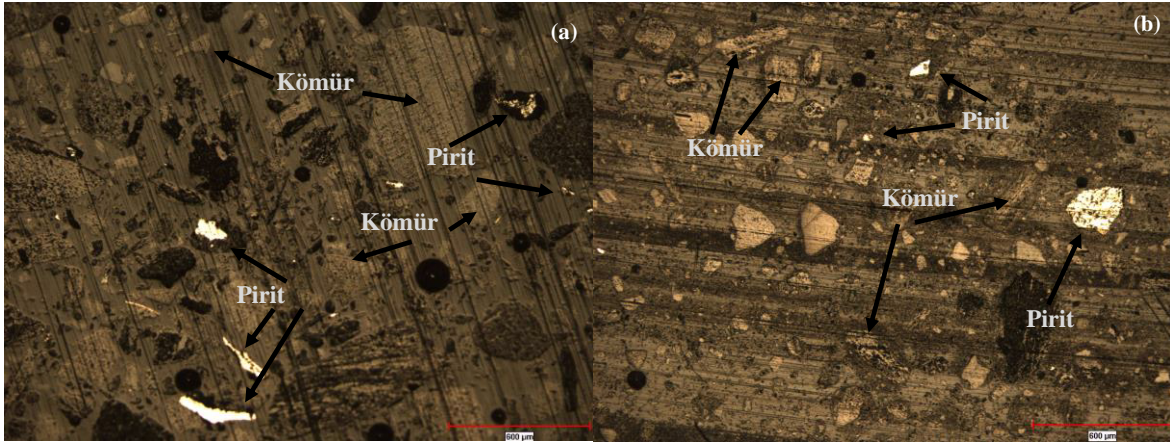


şlam boyutlu malzemenin de dahil olduğu -500  $\mu\text{m}$  ve şlam malzemenin uzaklaştırılmış olduğu -500 +25  $\mu\text{m}$  boyutlarında iki ayrı örnek hazırlanmıştır. Her iki örneğin de analizleri yapılmış olup sırasıyla Tablo 2.7 ve Tablo 2.8’de gösterilmiştir. Tablolardan görüleceği üzere şlam uzaklaştırıldıktan sonra örneğin kül oranının oldukça fazla oranda düştüğü görülmektedir.

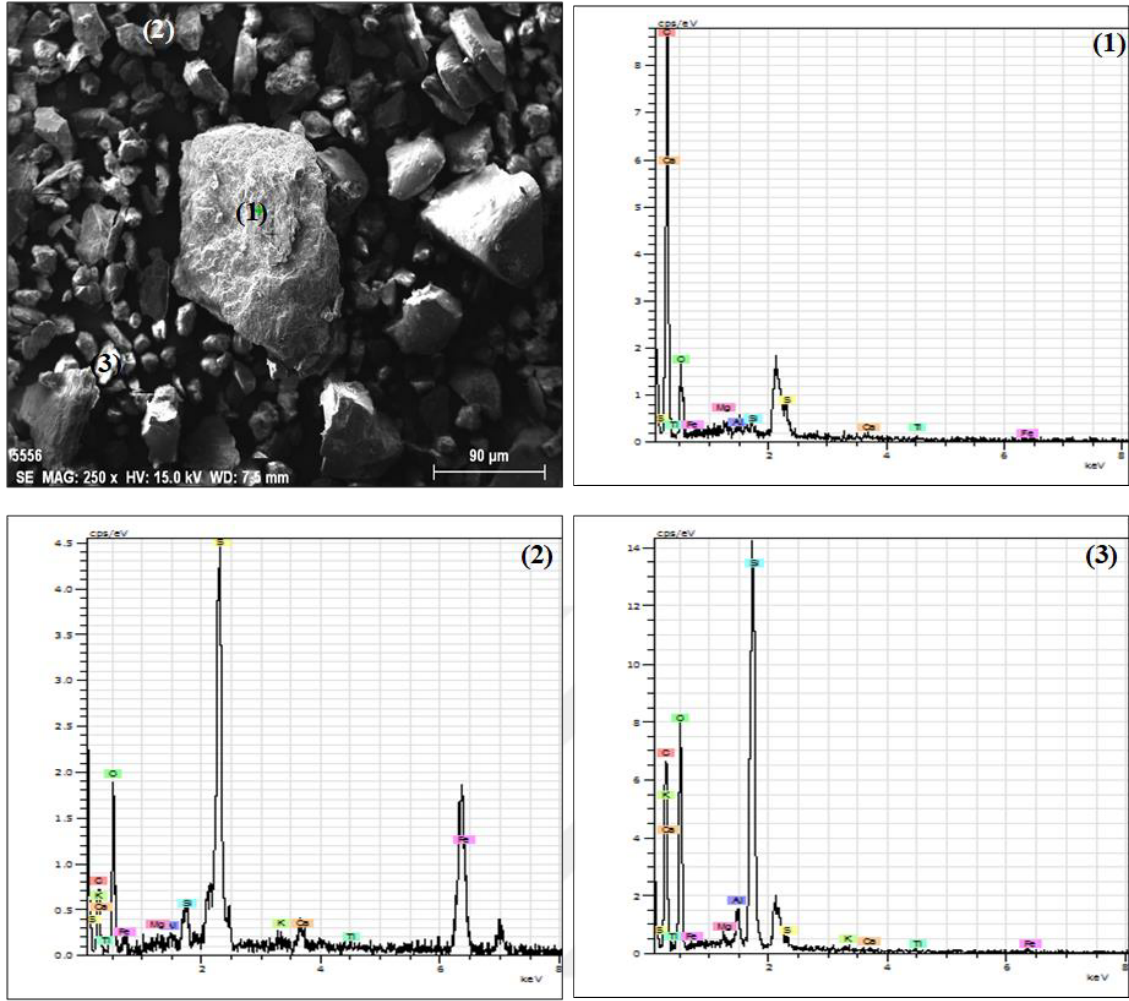
Tablo 2.7. -500  $\mu\text{m}$  ve -500 +25  $\mu\text{m}$  boyutlu atıkların tam analizi

	-500 $\mu\text{m}$		-500 +25 $\mu\text{m}$	
	Havada Kuru	Kuru	Havada Kuru	Kuru
<b>Nem (%)</b>	3,37	-	3,62	-
<b>Kül (%)</b>	68,68	71,08	52,6	54,58
<b>Uçucu Madde (%)</b>	19,73	20,42	25,13	26,07
<b>Sabit Karbon (%)</b>	8,22	8,50	18,65	19,35
<b>Toplam Kükürt (%)</b>	1,81	1,87	2,91	3,01

-500 +25  $\mu\text{m}$  boyutlu malzemenin parlak kesiti analizi yapılmış ve çeşitli boyutlarda pirit mineralleri içerdiği görülmüştür (Şekil 2.5). Ayrıca SEM-EDS analizleri de yapılmıştır (Şekil 2.6 ve Tablo 2.8).



Şekil 2.5. Şlamı atılmış (-500 +25  $\mu\text{m}$ ) atıkların parlak kesit görüntüsü



Şekil 2.6. Şlamı atılmış (-500 +25  $\mu\text{m}$ ) atıkların SEM-EDS analizi

Tablo 2.8. SEM-EDS analizinde belirlenen noktaların elementel analizi

Element (%)	Kömür		
	1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta
C	52,70	4,74	21,79
O	40,86	16,68	51,48
Al	0,22	0,27	1,34
Si	0,44	2,28	19,08
S	3,56	30,51	3,08
Fe	0,95	41,22	1,38
Mg	0,27	0,23	0,34
Ca	0,49	1,73	0,51

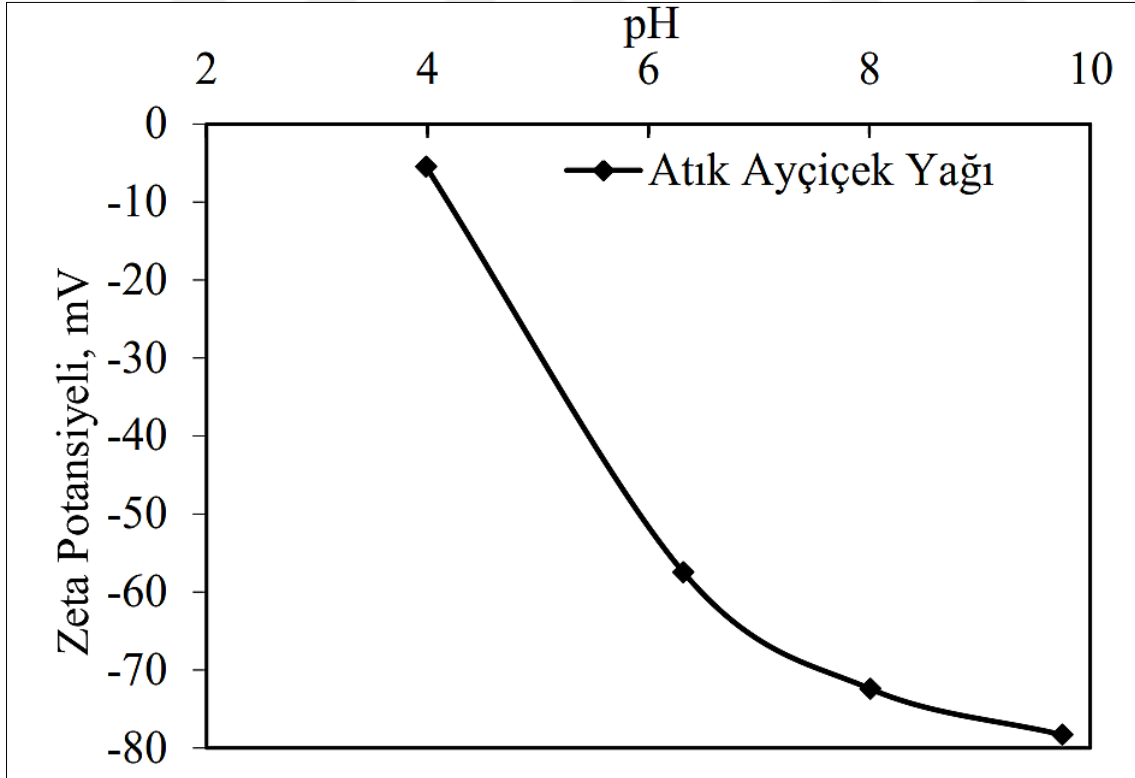
Deney sonuçlarının irdelenmesinde gerekli olacağı için kömürün zeta potansiyeli ölçümü yapılmıştır. Ölçümler Zetasizer Nano-ZS90 tipi zeta potansiyeli ölçüm cihazı ile

yapılmıştır. Zeta potansiyeli ölçümleri için yüzdürme-batırma deneyleri sonucunda elde edilen temiz kömür örnekleri kullanılmıştır. Kömür örneği, %0,1 katı oranı olacak şekilde ayarlanmıştır. pH ayarlamaları için NaOH ve HCl kullanılmıştır. Zeta potansiyelinin pH'a bağlı olarak değişim grafiği 'Bulgular ve Tartışma' kısmında verilmiştir.

### 2.3. Atık Bitkisel Yağın Özellikleri

Bu çalışmada bağlayıcı sıvı olarak daha önceden Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği kantininden toplanılmış atık bitkisel yağlar kullanılmıştır. Atık bitkisel yağların içindeki safsızlıkların uzaklaştırılması amacıyla atık yağ vakum filtre ile süzülmüştür. Atık bitkisel yağın yoğunluğu  $0.91 \text{ gr/cm}^3$  ve vizkozitesi  $35.81 \text{ mm}^2/\text{s}$ 'dir (Şahinoğlu, 2012).

Atık bitkisel yağın zeta potansiyeli ölçümü Zetasizer Nano-ZS90'da yapılmıştır. Atık bitkisel yağın pH'a bağlı zeta potansiyeli Şekil 2.7'de görülmektedir. Aglomerasyon deneylerinin yapıldığı 6,34 pH değerinde atık yağın zeta potansiyelinin negatif olduğu görülmektedir.



Şekil 2.7. Atık bitkisel yağın zeta potansiyeli (Şahinoğlu, 2012).



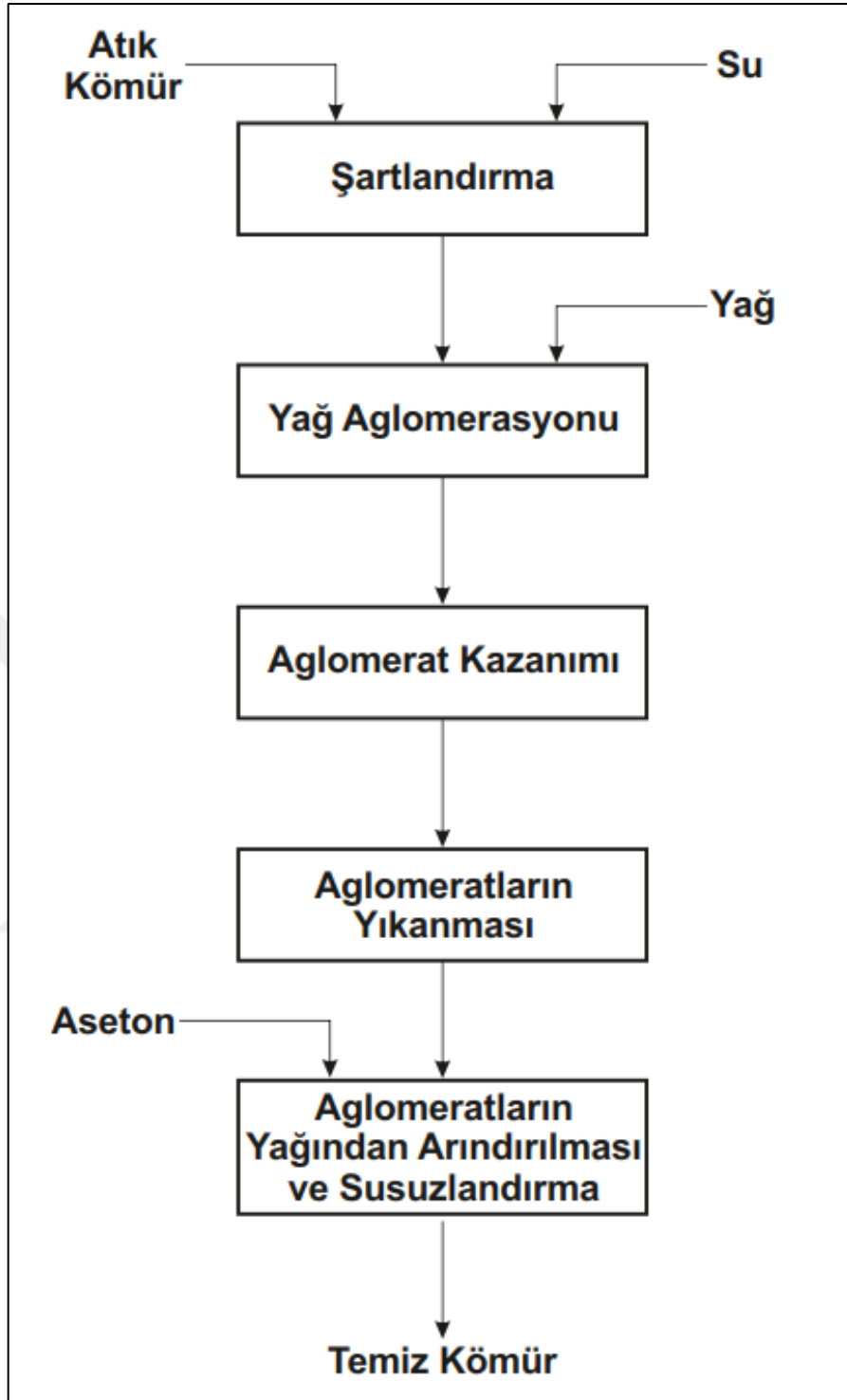
## 2.4. Aglomerasyon Deneilerinin Yapılışı

Yağ aglomerasyonu yönteminin şlam içeren kömürlerde de başarılı olduğu şeklinde literatürde yer alan bilgiler sebebiyle, deneysel çalışmaların başlangıcında, şlam boyutlu malzemenin de dahil olduğu -500 µm boyutlu örnek aglomerasyon testlerine tabii tutulmuş, daha sonrada şlamı atılmış malzeme (-500 +25 µm) üzerinde aglomerasyon testleri yapılmıştır. Aglomerasyon deneylerinde iç çapı 11,7 cm olan silindirik cam bir kap kullanılmıştır. Karıştırma işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi kaba 4 adet dalgakıran monte edilmiştir. Karıştırıcı olarak RZR 2021 model, pervane çapı 50 mm olan ve 4 adet pervaneli mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Deneyler saf su kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak kömürün su ile tamamen ıslanması için kömür-su karışımı 1000 dev/dk karıştırma hızında 5 dakika şartlandırılmıştır. Ardından yağ ilave edilerek karıştırma hızı 1400 dev/dk ya çıkarılmış ve kömürlerin aglomere olmaları sağlanmıştır. Oluşan aglomeratları kazanmak için malzeme 500 µm'lik eleğe beslenmiş ve elek üstünde kalan kısım 1,5 litre su ile yıkanarak aglomeratlar temizlenmiştir. Kazanılan aglomeratlar susuzlandırılmak için vakum filtreye konulmuş ve filtrasyon sırasında 200 ml aseton ile yıkanmıştır. Yağından arındırılıp susuzlandırılmış aglomeratlar 105°C ± 5° C'de etüvde kurutulmuş, 2 saat desikatörde soğutulduktan sonra tartımları alınmıştır.

Şlam boyutlu malzemenin (-500 µm) dahil olduğu aglomerasyon testlerinde sadece yağ dozajı, katı oranı, dağıtıcı miktarı değişken olarak kullanılırken şlamı atılmış malzemenin (-500 +25 µm) aglomerasyon testlerinde yağ dozajı, katı oranı, karıştırma hızı ve süresi, ortam pH'ı, yıkama suyu miktarı, kömür tane boyutu ve kazanım elek boyutu, yağ cinsi değişken olarak incelenmiştir. Kömür tane boyutunun çalışıldığı testler için örnek kontrollü olarak öğütülerek -300 µm ve -125 µm boyutlarına indirilmiştir. Ayrıca çeşitli tuzların ve sürfaktantların aglomerasyon performansı üzerine etkisi belirlenmiştir. Son olarak, aglomerasyon yönteminin en önemli aşamalarından olan aglomerat kazanımı işlemi elekler yerine flotasyon yöntemiyle yapılarak aglomerasyon işleminin, özellikle organik malzeme verimi açısından performansı arttırılmaya çalışılmıştır. Aglomerat kazanma yöntemi olarak flotasyonun kullanıldığı testlerde ise köpük alma süresi, şartlandırma süresi, karıştırma hızı, köpürtücü dozajı ve kömür tane boyutu değişken olarak incelenmiştir. Aglomerasyon testlerinin görüntüleri ve akım şeması Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da ve deney koşulları ve parametreleri detaylı olarak Tablo 2.9 ve Tablo 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Aglomerasyon test görüntüleri ve aşamaları (a) karıştırma, (b) aglomerat kazanımı, (c) aglomeratların yıkanması, (d) aglomeratların yakından görünümü, (e) vakum filtrede aglomeratların yağından arındırılması ve susuzlandırma, (f) yağsız temiz kömür.



Şekil 2.9. Yağ aglomerasyonu testlerinin akım şeması

Tablo 2.9. Aglomerasyon testlerinin koşulları

Değişkenler	Deney Koşulları									
	Yağ Dozajı (%)	Katı Oranı (%)	Karıştırma Hızı (dev/dk)	Karıştırma Süresi (dk)	Ortam pH'ı	Yıkama Suyu Miktarı (l)	Kömür tane ve elek boyutu (µm)	Yağ cinsi	Tuz (mg/l)	Sümfaktant (ml/g)
Yağ Dozajı	5-25	10	1400	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Katı Oranı	15	5-30	1400	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Karıştırma Hızı	15	10	1000-1600	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Karıştırma Süresi	15	10	1400	2,5-20	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Ortam pH'ı	15	10	1400	10	2-10	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Yıkama Suyu Miktarı	15	10	1400	10	6,34	0,75-2,25	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	-
Kömür tane ve elek boyutu	15	10	1400	10	6,34	1,5	-500 500; vd* <sup>1</sup> -300 300; vd* <sup>2</sup> -125 125; vd* <sup>3</sup>	Atık bitkisel yağ	-	-
Yağ cinsi	15	10	1400	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ, vd* <sup>4</sup>	-	-
Tuz	15	10	1400	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	NaCl, CaCl <sub>2</sub> , BaCl <sub>2</sub> , MgCl <sub>2</sub> , CuCl <sub>2</sub> , ZnCl <sub>2</sub> , AlCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub>	-
Sümfaktant	15	10	1400	10	6,34	1,5	-500 500	Atık bitkisel yağ	-	SDS, HTAB, Triton X-405

\*<sup>1</sup>-500 µm boyutlu örnek için 500 µm, 600 µm ve 850 µm boyutlarında elek kullanılmıştır.

\*<sup>2</sup>-300 µm boyutlu örnek için 300 µm, 500 µm ve 600 µm boyutlarında elek kullanılmıştır.

\*<sup>3</sup>-125 µm boyutlu örnek için 125 µm, 300 µm ve 500 µm boyutlarında elek kullanılmıştır.

\*<sup>4</sup> Gaz yağı, Fuel oil, motorin ve motor yağı kullanılmıştır.

Tablo 2.10. Aglomerat kazanımında flotasyon testlerinin koşulları

Değişkenler	Deney Koşulları				
	Şartlandırma Süresi (dk)	Köpük Alma Süresi (dk)	Karıştırma Hızı (dev/dk)	Köpürtücü Miktarı (g/ton)	Tane Boyu (µm)
Şartlandırma Süresi	0-5	2	1000	0	-500
Köpük Alma Süresi	5	0,5-2	1000	0	-500
Karıştırma Hızı	5	2	800-1400	0	-500
Köpürtücü Miktarı	5	2	1000	0-300	-500
Tane Boyu	5	2	1000	0	-500 -300 -125

Aglomerasyon sonucu elde edilen temiz kömürlerin kül analizi ASTM-3174 ve kükürt analizleri ASTM-4239b standartlarına göre yapılmıştır. Analiz sonuçları ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak organik malzeme verimi (%OMV), kül azaltma oranı (%KAO), kükürt azaltma oranı (%SAO), kül ayırma etkinliği (%KAE) ve kükürt ayırma etkinliği (%SAE) hesaplanmıştır.

$$OMV (\%) = [(M_P / M_F) \times ((100 - A_P) / (100 - A_F))] \times 100 \quad (1)$$

$$KAO (\%) = [1 - ((M_P) \times (A_P) / (M_F) \times (A_F))] \times 100 \quad (2)$$

$$SAO (\%) = [1 - ((M_P) \times (S_P) / (M_F) \times (S_F))] \times 100 \quad (3)$$

$$KAE (\%) = OMV + KAO - 100 \quad (4)$$

$$SAE (\%) = OMV + SAO - 100 \quad (5)$$

Burada;

$M_P$ : Konsantrenin kuru-yağsız ağırlığı (g),

$M_F$ : Beslemenin kuru ağırlığı (g)

$A_F$ : Beslemenin kuru bazda kül içeriği (%)

$A_P$ : Konsantrenin kuru yağsız bazda kül içeriği (%)

$S_F$ : Beslemenin kuru bazda kükürt içeriği (%)

$S_P$ : Konsantrenin kuru yağsız bazda kükürt içeriği (%)

### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

Bu bölümde aglomerasyon testlerinin sonuçları ortaya konulmuş, işlem verimi-etkinliği ve elde edilen kömür kalitesi açısından farklı parametrelerin etkileri incelenmiş ve tartışılmıştır. Sonuçlar SEM-EDS, XRD, parlak kesit, TG/DTG, mikroskobik inceleme gibi yöntemlerle desteklenmiştir.

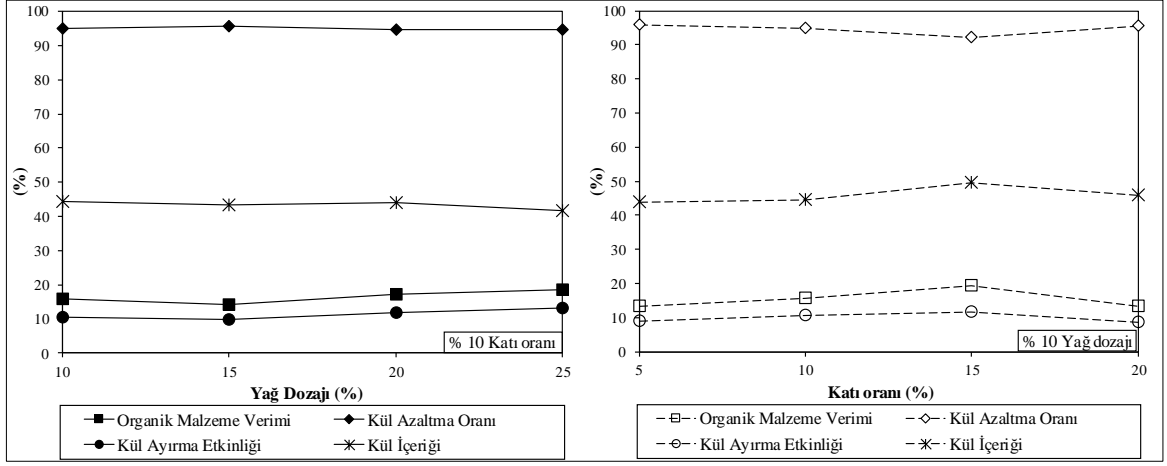
#### **3.1. Şlamlı Atıkların Aglomerasyonu**

İlk olarak Tunçbilek lavvar atıkları şlam boyutlu malzeme (-25 µm) uzaklaştırılmadan doğrudan aglomerasyon işlemine tabii tutulmuş, katı oranı, yağ dozajı ve dağıtıcı reaktiflerin performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

##### **3.1.1. Katı Oranı ve Yağ Dozajının Etkisi**

Yağ dozajı ve katı oranının etkisini belirlemek için yapılan aglomerasyon deneylerin sonuçları Şekil 3.1'de görülmektedir. Şlam boyutlu (-25 µm) malzemenin de dahil olduğu numune ile yapılan çalışmalarda, %68,7 kül içerikli atık kömürden en iyi koşullarda %41,5 küllü temiz kömür %18,3 organik malzeme verimi ve %94,7 kül azaltma oranıyla elde edilmiştir (Şekil 3.1). Kül ayırma etkinliğinin %13,0 seviyelerinde kaldığı gözlemlenmiştir. Görüleceği üzere %90'ların üzerinde kül azaltma oranları elde edilmesine rağmen organik malzeme verimleri %20'lerin altı gibi oldukça düşük bir düzeyde kalmıştır. Şlamın kömür taneciklerinin yüzeyini kaplaması ve ortamda yoğun bir şekilde bulunmaları sebebiyle kömür taneleri ve yağ damlacıkları arasındaki temas sayısı ve gücü yetersiz kalmış ve organik malzeme verimi olumsuz etkilenmiştir.

Şekil 3.1'den de görüleceği gibi yağ dozajı arttıkça organik malzeme verimi artmıştır. Bunun sebebi ortamdaki yağ damlacıklarının miktarının artmasıyla kömür ve yağ damlacıklarının çarpışma olasılığının artması ve oluşan aglomerat sayısının artmasından kaynaklanmaktadır. Yağ miktarının artmasıyla beraber konsantrenin kül içeriği düşmüştür. Bu durum kömür taneciklerinin yağ damlacıklarıyla çok daha iyi kaplanmasıyla açıklanabilir.



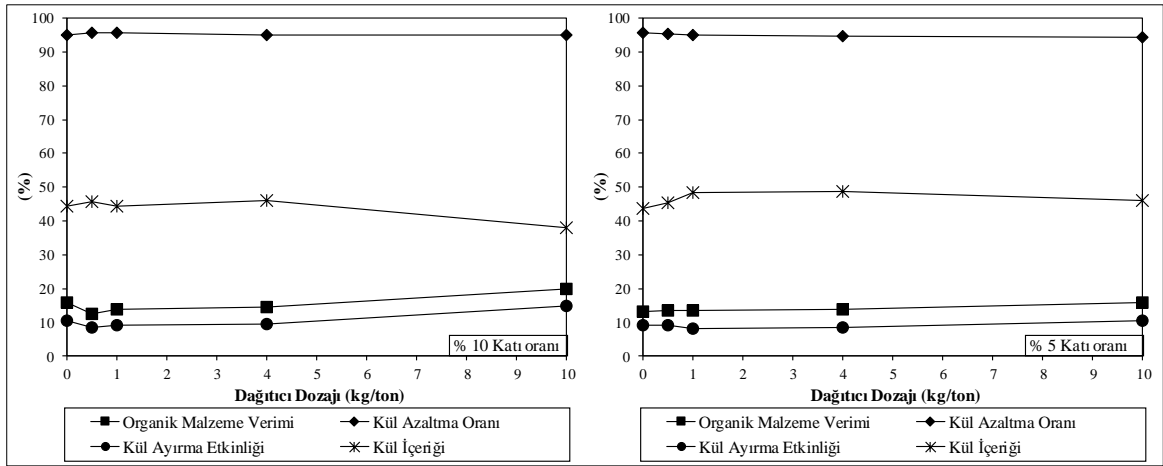
Şekil 3.1. Yağ dozajı ve katı oranının aglomerasyon performansı üzerine etkisi

Şekil 3.1’de görüleceği üzere katı oranının artmasıyla organik malzeme veriminde %15 katı oranına kadar çok az bir artış görülmüştür. Katı oranının daha da artmasıyla yine çok az bir azalma görülmüştür. Bu dalgalanmanın sebebi katı oranı %15 oranına kadar artıkça kömür taneleriyle yağ damlacıklarının etkileşme ihtimali artarken ortamdaki katı oranı daha da artıkça yöntemin seçimliliği olumsuz etkilenmiştir. Kül azaltma oranı ise katı oranının değişmesinden etkilenmemiştir. Katı oranının en düşük olduğu %5 katı oranında %95,8 kül uzaklaştırma oranıyla %43,8 küllü konsantre elde edilmiştir.

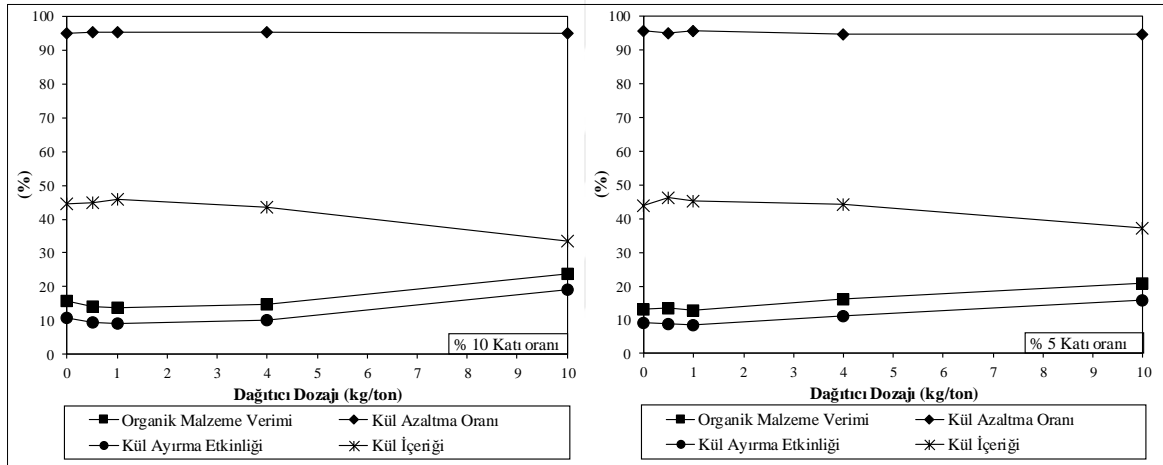
### 3.1.2. Dağıtıcıların Aglomerasyona Etkisi

Yüksek miktarda kül yapıcı mineral madde içeren, %68,7 küllü lavvar atığı şlam atma işlemi yapmadan kazanabilmek amacıyla dağıtıcıların kullanılması düşünülmüştür. Sodyum Silikat (Şekil 3.2), Sodyum Trifosfat (Şekil 3.3), Sodyum Hekzametafosfat (Şekil 3.4) gibi dağıtıcılar iki farklı katı oranında (%5 ve %10 katı oranı) ve 0,5-10 kg/ton gibi çok geniş bir dozaj aralığında yağ aglomerasyonu deneylerinde kullanılmıştır.

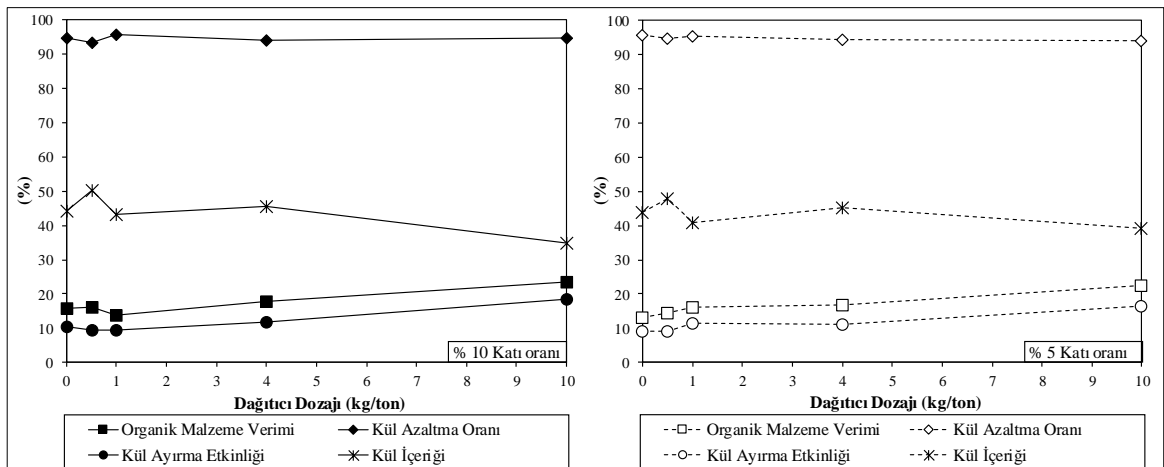
Dağıtıcıların kullanılmadığı durumda %10 katı oranında %15,7 olan organik malzeme verimi Sodyum Silikat, Sodyum Trifosfat ve Sodyum Hekzametafosfat kullanılmasıyla sırasıyla en yüksek %19,7, %23,9 ve %23,5 olarak ve %5 katı oranında %13 olan organik malzeme verimi Sodyum Silikat, Sodyum Trifosfat ve Sodyum Hekzametafosfat kullanılmasıyla sırasıyla en yüksek %15,9, %21,0 ve %22,5 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Sodyum Silikat dozajının aglomerasyon performansına etkisi



Şekil 3.3. Sodyum Trifosfat dozajının aglomerasyon performansına etkisi



Şekil 3.4. Sodyum Hekzametafosfat dozajının aglomerasyon performansına etkisi



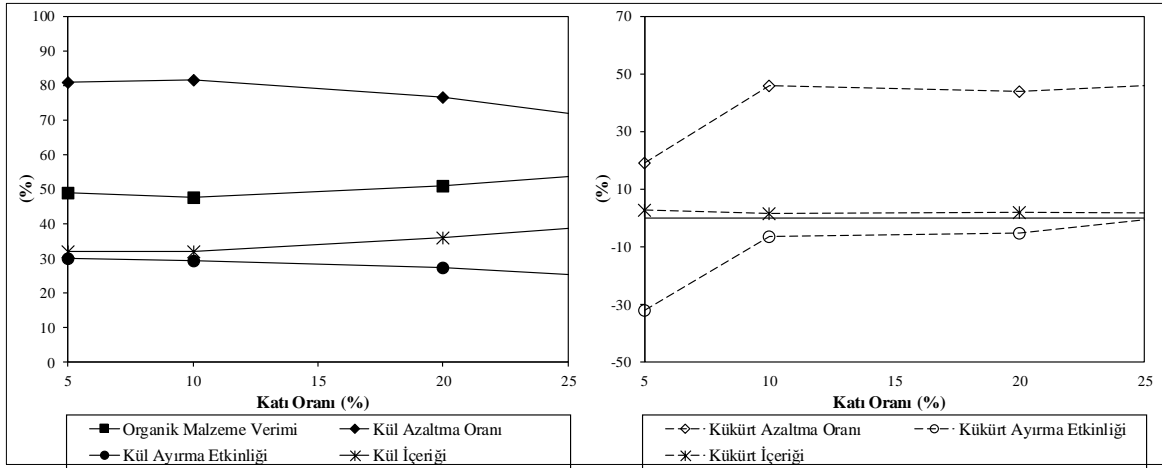
Sodyum Silikat, Sodyum Trifosfat ve Sodyum Hekzametafosfat kullanılmasıyla çok yüksek dozajlarda çok sınırlı organik malzeme verimi elde edilebilirken kül azaltma oranına belirgin bir etkisi olmamıştır.

### 3.2. Şlamsız Atıkların Aglomerasyonu

Şlam kısmı uzaklaştırılmamış lavvar atığı üzerinde yapılan aglomerasyon testlerinin tatmin edici sonuçlar vermemesi nedeniyle şlamı atılmış lavvar atıklarının aglomerasyon işlemine geçilmiştir. Yapılan çalışmada katı oranının, yağ dozajının, yağ cinsi, karıştırma hızının ve süresinin, tane boyutu ve elek boyutu, yıkama suyu miktarı, ortam pH'ı, gibi parametrelerin etkileri incelenmiş, tuzlar ve süfaktantlar ilave edilerek, ayrıca aglomerat kazanımında elek yerine flotasyon kullanılarak aglomerasyon işleminin performansı arttırılmaya çalışılmıştır.

#### 3.2.1. Katı Oranının Aglomerasyona Etkisi

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi katı oranı arttıkça organik malzeme verimi artmıştır. Katı oranının %5'den %30'a çıkmasıyla organik malzeme verimi %48,9'dan %56,1'e ulaşmıştır. Katı oranı arttıkça organik malzeme oranının artmasının sebebi, ortamdaki kömür taneleri arasındaki mesafenin azalmasıyla açıklanabilir. Ortamdaki kömür miktarının artması kömür tanecikleriyle yağ damlacıklarının temas etme olasılığını da arttırmaktadır. Aktaş (2002), Gürses vd. (2003) ve Şahinoğlu ve Uslu (2008) yaptıkları çalışmalarda katı oranı arttıkça organik malzeme veriminin arttığını belirtmişlerdir. Organik malzeme veriminin aksine katı oranı arttıkça kül azaltma oranı azalmaktadır. %10 katı oranındaki %81,5'lük kül azaltma oranı, katı oranının %30'a çıkmasıyla %67,3'e gerilemiştir. Katı oranı arttıkça kömür tanecikleri ile yağ damlacıkları arasına giren mineral madde miktarı artmıştır. Ortamda kolayca dağılan kil parçacıklarının da oluşan aglomeratların arasına ve içlerine yerleşmesiyle beraber işlemin seçimliliği azalmıştır. Katı oranının %5'den %30'a yükselmesiyle kül ayırma etkinliği %29,8'den %23,4'e düşmüştür. Birçok çalışmada benzer şekilde katı oranı arttıkça kül azaltma oranının olumsuz bir şekilde etkilendiği belirtilmiştir (Aktaş, 2002; Gürses vd., 2003; Temel ve Ayhan, 2006; Unal ve Erşan, 2007; Lin vd., 2012; Şahinoğlu ve Uslu, 2014; Yavuz ve Uslu, 2015; Akhtar vd., 2016; Yadav vd., 2017).



Şekil 3.5. Katı oranının aglomerasyon performansına etkisi

Katı oranının artmasıyla beraber konsantrenin kükürt içeriği düşmüş ve dolayısıyla kükürt azaltma oranı artmıştır. Katı oranı %30 olduğunda %47,9 değeriyle en yüksek kükürt azaltma oranı ve %4 değeriyle en yüksek kükürt ayırma etkinliği elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Gürses vd., 2003; Temel ve Ayhan, 2006; Şahinoğlu ve Uslu, 2015; Yavuz ve Uslu, 2015).

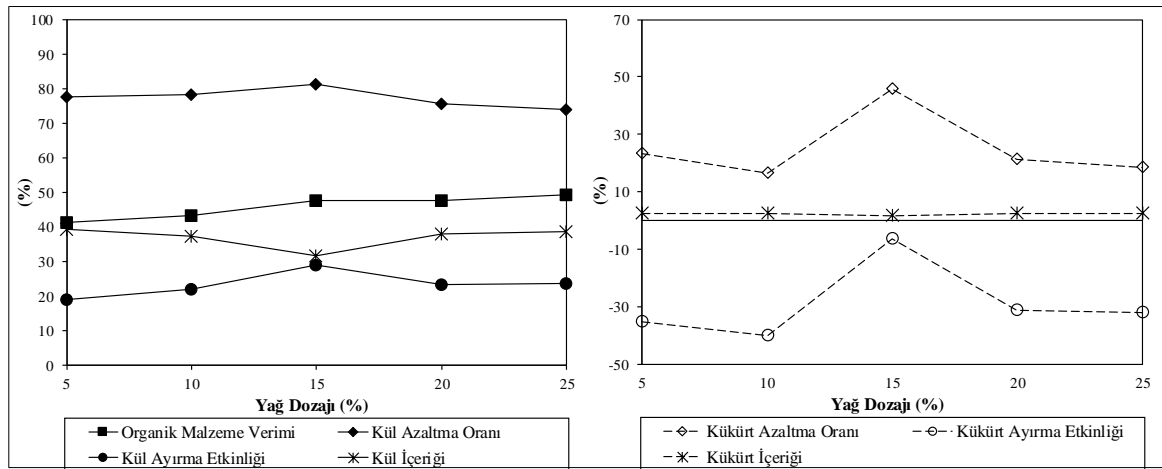
### 3.2.2. Yağ Dozajının Aglomerasyona Etkisi

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yağ dozajının artmasıyla organik malzeme verimi de artmıştır ve %25 yağ oranında organik malzeme verimi %49,4 ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bunun en önemli nedeni yağ dozajının artmasıyla kömür tanecikleri ile yağ damlacıkları arasındaki temas sayısındaki artışla birlikte daha fazla aglomerat oluşmasıdır. Şekil 3.6'dan görülebileceği gibi ortamda çok miktarda yağ damlacığının bulunmasıyla aglomeratların boyutları da artmıştır.

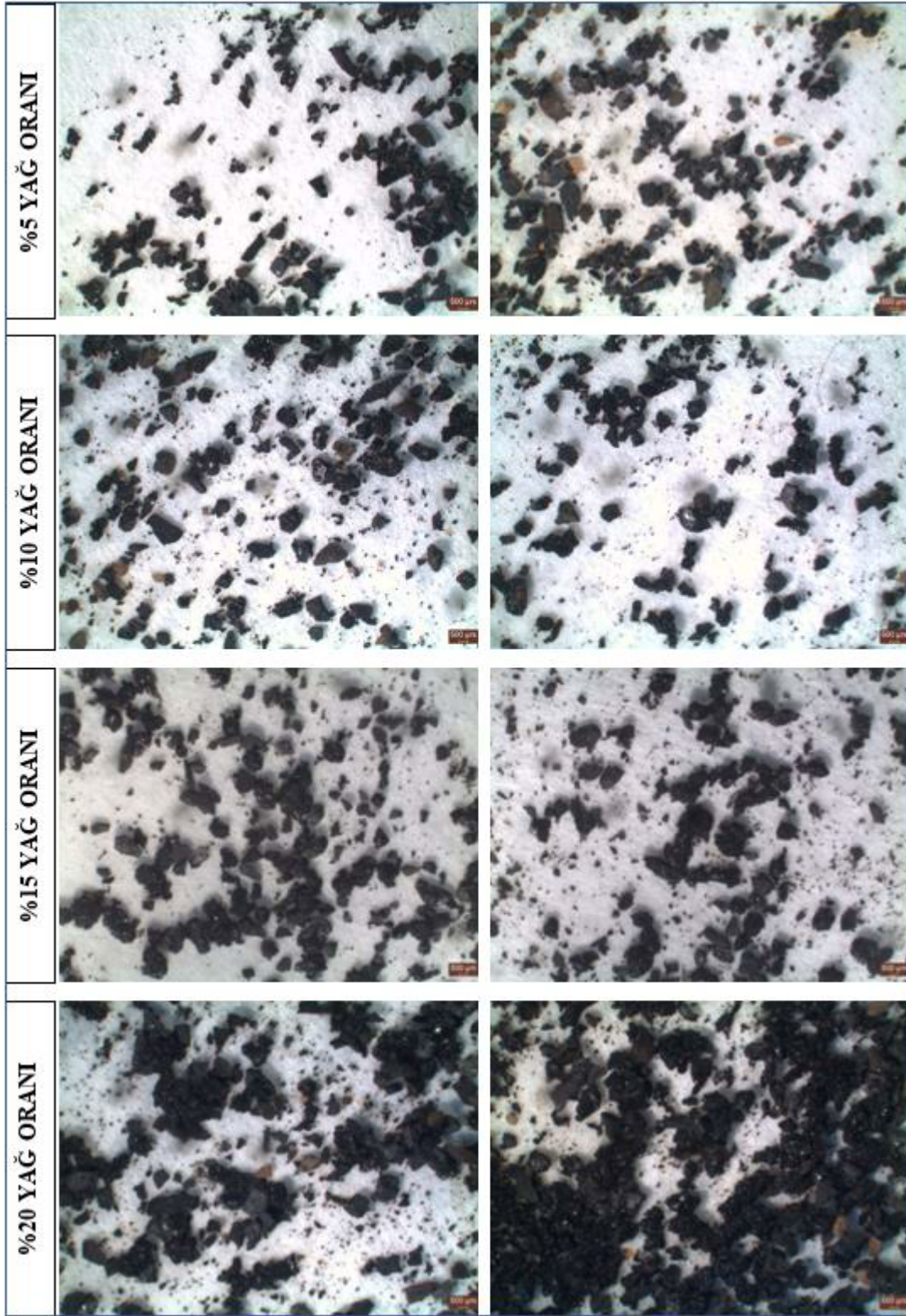
Baruah vd. (2000) yaptıkları çalışmada benzer şekilde bağlayıcı olarak kullandıkları xylene miktarı arttıkça organik malzeme veriminin arttığını tespit etmişlerdir. Laskowski ve Yu (2000) gaz yağı kullandıkları çalışmada yağ miktarı arttıkça organik malzeme veriminin arttığını belirtmişlerdir. Baruah vd. (2000), Laskowski ve Yu (2000) ve Ünal ve Erşan (2005) aglomerasyonda yağ dozajının artan miktarının organik malzeme verimini olumlu yönde etkilediğini rapor etmişlerdir. Bazı çalışmalarda ise yağ dozajının belli bir seviyesine kadar organik malzeme miktarı artmış, dozajın daha da artışıyla tekrar azalmıştır (Alonso vd.,

2002; Cebeci vd., 2002; Chen vd., 2013; Kumar vd., 2015; Garg vd., 2017). Bunun sebebinin, belirli yağ oranından sonra aglomeratların kararsız yağ topaklarına dönüşüp parçalanmaları olduğu gösterilmiştir (Şahinoğlu ve Uslu, 2008).

Kül ve kükürt azaltma oranı %15 yağ oranında en yüksek değere ulaşarak sırasıyla %81,5 ve %45,9 değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek kül ayırma etkinliği %29,1 ve en yüksek kükürt ayırma etkinliği %-6,5 olarak elde edilmiştir. Yağ miktarının belli bir orandan sonra kül ve kükürt azalmasına olumsuz etkisinin sebebi yağ damlacıklarının seçimliliğinin azalmasıdır. Ortamdaki yağ taneciklerinin sayısının artmasıyla, yağ damlacıkları hidrofobluğu daha düşük inorganik malzemeleri de aglomeratların bünyesine almaya başlamıştır. Ayrıca, yağ miktarının artmasıyla daha büyük ve gevşek yapıları oluşan aglomeratların iç boşluklarına mineral maddelerin girmesi kolaylaşmıştır. Yağ miktarının belli bir değer üstüne çıkmasıyla oluşan kül ve kükürt ayırma etkinliğindeki azalma başka çalışmalarda da rapor edilmiştir (Garcia vd., 1995; Cebeci vd., 2002; Şahinoğlu ve Uslu, 2008).



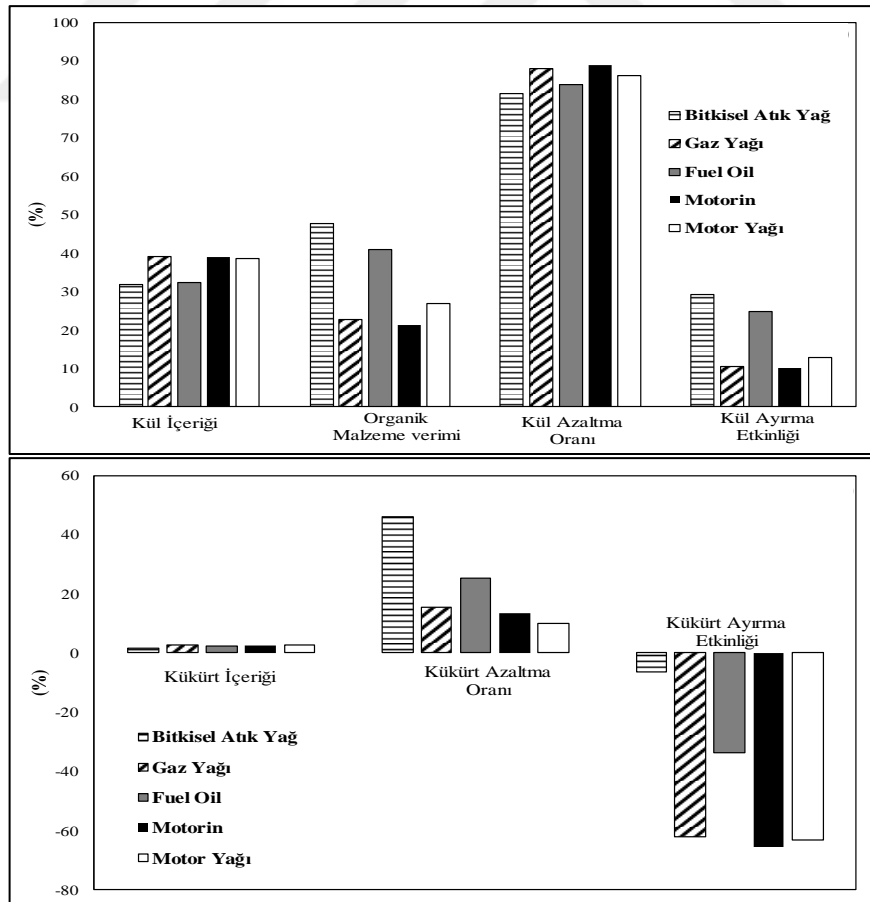
Şekil 3.6. Yağ dozajının aglomerasyon performansına etkisi



Şekil 3.7. Yağ dozajına bağlı olarak aglomerat boyutlarının değişimi

### 3.2.3. Yağ Cinsinin Aglomerasyona Etkisi

Yağ cinsinin etkisinin belirlendiği deneylerde farklı yağlar, atık bitkisel yağ ile aynı test koşullarında incelenmiştir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi en yüksek organik malzeme verimi bitkisel atık yağ kullanıldığında %47,6 olarak elde edilmiş ve atık yağı %40,9 organik malzeme verimi ile fuel-oil izlemektedir. Motor yağı, gaz yağı ve motorin kullanıldığında sırasıyla %26,8, %22,6 ve %21,2 organik malzeme verimi elde edilmiştir. En yüksek organik malzeme verimin atık bitkisel yağ ve fuel-oil ile elde edilmesinin sebebi kullanılan yağlar içinde en yüksek yoğunluk değerlerine sahip olmalarıdır. Yüksek yoğunluklu yağların yüzeylerinde taşıdıkları polar gruplar sebebiyle özellikle oksitlenmiş ve hidrofilik özellik gösteren kömür yüzeylerine daha kolay adsorblandığı bilinmektedir (Özer, vd., 2017). Aglomerasyon deneylerinde kullanılan atık bitkisel yağ, fuel-oil, motor yağı, gaz yağı ve motorinin yoğunlukları sırasıyla 0,91 g/cm<sup>3</sup>, 0,90 g/cm<sup>3</sup>, 0,87 g/cm<sup>3</sup>, 0,81 g/cm<sup>3</sup> ve 0,85 g/cm<sup>3</sup> olarak daha önceki çalışmada belirlenmiştir (Şahinoğlu, 2012).



Şekil 3.8. Yağ cinsinin aglomerasyon performansına etkisi

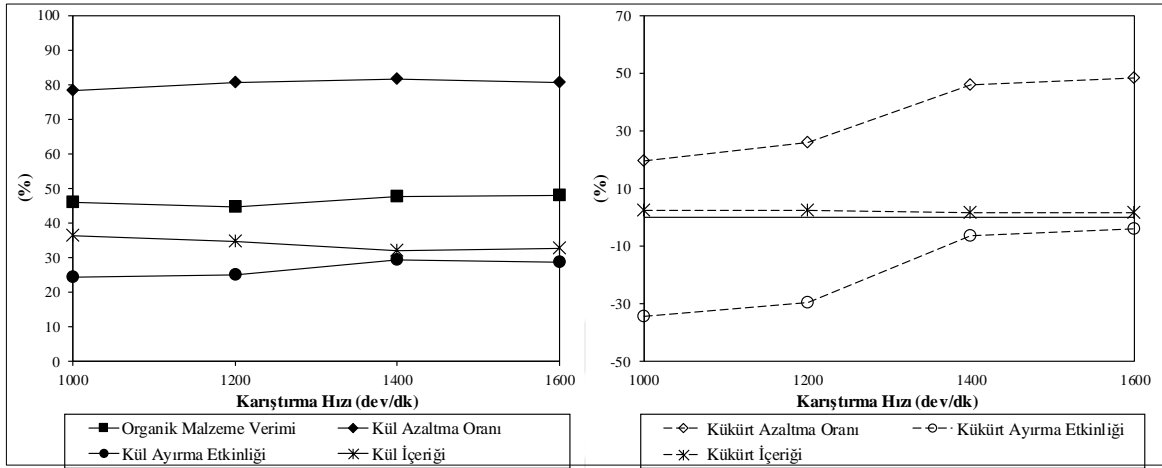
Atık bitkisel yağ ve fuel-oil kullanıldığında organik malzeme veriminin aksine kül azaltma oranları düşmüştür. Atık bitkisel yağ kullanıldığında %81,5 olan en düşük kül azaltma oranı elde edilmiştir. Bunun sebebi yağın yoğunluğunun arttıkça seçimliliğinin azalmasıdır. Hafif yağların çok daha seçimli ayırma yaptığı, ağır yağlarla daha küllü ürün fakat daha yüksek organik malzeme verimlerinin elde edildiği literatürde sıkça vurgulanmaktadır (Mehrotra vd., 1983; Kawatra ve Eisele, 2001). Ağır yağlardaki yüzey aktif fonksiyonel grupların, kül yapıcı mineral yüzeylerini hidrofobik yaptığı da rapor edilmiştir (Tsai, 1982; Kawatra ve Eisele, 2001). En düşük kül azaltma oranının elde edilmesinin aksine atık bitkisel yağlarda en az kükürt içerikli konsantre %45,9 kükürt azaltma oranıyla elde edilmiştir. Atık bitkisel yağın daha uzun süreli kızartma işlemlerinde kullanıldığında performans üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla 5 farklı sürede (1-5 saat) kızartma işlemi yapılmış fakat sonuçların değişmediği gözlenmiştir.

#### **3.2.4. Karıştırma Hızının Aglomerasyona Etkisi**

Karıştırma hızının artmasıyla Şekil 3.9'da görüldüğü gibi elde edilen organik malzeme miktarı da artmıştır. En yüksek organik malzeme verimi %47,8 değeriyle 1600 dev/dk'da elde edilmiştir. Karıştırma hızı arttıkça organik malzeme veriminin artmasının sebebi, kömür parçacıkları ile yağ damlacıklarının temas ihtimalinin artmasıdır. Ayrıca küçük aglomeratların birbirlerine tutunma olasılığı da artmakta ve daha büyük boyutlu aglomeratlar oluşmaktadır. Şahinoğlu ve Uslu (2008) yaptığı çalışmada benzer şekilde karıştırma hızı arttıkça organik malzeme veriminin arttığını belirtmişlerdir. Birçok çalışmada da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Çuhadaroğlu, 1994; Alonso vd., 2002; Valdes ve Garcia, 2006; Akhtar vd., 2016; Mustafa vd., 2016). Karıştırma hızının artışı, yağın emülsifiye olarak ortamda daha küçük damlacıklar halinde bulunmasını ve dağılmasını da sağladığından verimin daha fazla olmasına sebebiyet vermektedir.

Karıştırma hızı arttıkça kömürden daha fazla kül ve kükürt uzaklaşmıştır. Bununla birlikte kül azaltma oranı 1400 dev/dk'dan sonra az miktarda düşmüştür. En yüksek kül azaltma oranı %81,5 olarak ve en yüksek kükürt azaltma oranı ise %48,3 olarak elde edilmiştir. Karıştırma hızının artışı kömür ve mineral maddenin birbirinden daha kolay ayrılmasını sağlamıştır. Kül azaltma oranında 1400 dev/dk'den sonra oluşan çok az miktardaki azalma ortamdaki çok hızlı karışmaya bağlı türbülansın yol açtığı aglomeratların içine mineral madde kaçtığından kaynaklanmaktadır. Daha önceki çalışmalarda,

aglomeratlardaki kül ve kükürt miktarındaki azalmanın, kritik karıştırma hızına kadar arttığı rapor edilmiştir (Şahinoğlu ve Uslu, 2008; Chen vd., 2013; Şahinoğlu ve Uslu, 2015). Kül ayırma etkinliği 1400 dev/dk karıştırma hızında %29,1 olan en yüksek değerine ulaşırken kükürt ayırma etkinliği 1600 dev/dk 'da %3,9 olan en yüksek değerine ulaşmıştır.



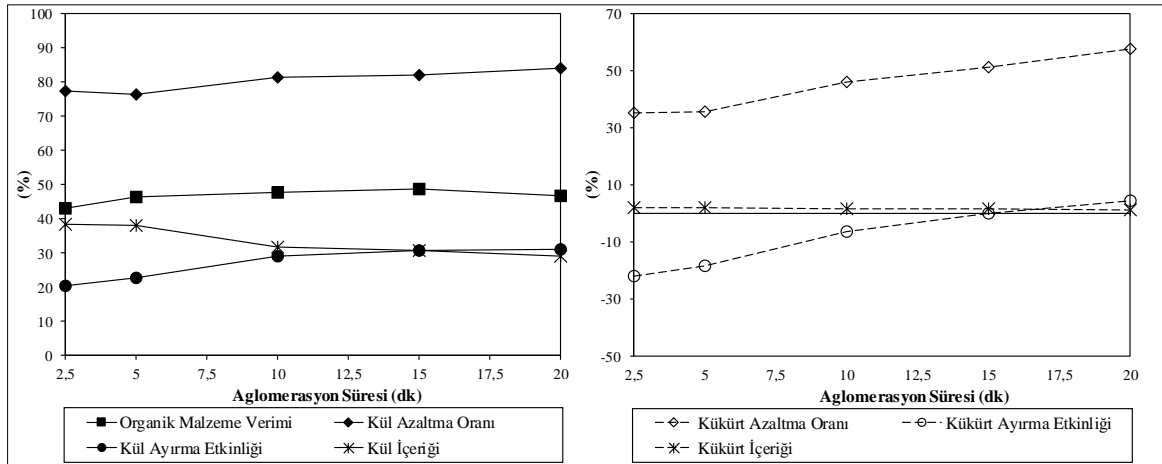
Şekil 3.9. Karıştırma hızının aglomerasyon performansına etkisi

### 3.2.5. Karıştırma Süresinin Aglomerasyona Etkisi

Karıştırma süresinin 15 dk'ya kadar artması organik malzeme verimini %48,6 değerine kadar yükselmiştir ve sürenin daha da artışıyla çok az miktarda bir düşme görülmüştür. Sürenin artmasıyla organik malzeme miktarının artmasının sebebi ortam içindeki kömür tanecikleri ile yağ damlacıklarının temas etme sayısının artmasıdır (Şekil 3.10). Fakat aglomerasyon süresinin bir noktadan sonra daha da artması ortamdaki dayanıklı olmayan aglomeratların parçalanmasıyla organik malzeme veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Benzer şekilde Wang vd. (2010) yaptıkları çalışmada aglomerasyon süresi arttıkça organik malzeme veriminin belli bir noktaya kadar arttığını ve bu noktadan sonra azaldığını belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra aglomerasyon süresinin artmasına bağlı olarak organik malzeme veriminin arttığını belirten çalışmalar da bulunmaktadır (Cebeci vd., 2002; Düzyol, 2015; Şahinoğlu ve Uslu, 2015).

Karıştırma süresinin artmasına bağlı olarak kül ve kükürt azaltma oranları da artmıştır ve sırasıyla %84,1 ve %57,6 olan en yüksek seviyelere 20 dk'lık aglomerasyon koşulunda ulaşılmıştır. Bu durumun sebebi, karıştırma süresi arttıkça kömür yüzeyi üzerine yapışmış ve aglomeratların içlerine girmiş kül ve kükürt yapıcı minerallerin karıştırmanın etkisiyle

aglomerat bünyesinden uzaklaşmasıdır. Kül ve kükürt ayırma etkinlikleri aglomerasyon süresi 20 dk olduğunda sırasıyla %30,9 ve %4,4 olan en yüksek değerlere ulaşmıştır. Ünal ve Erşan (2007) yaptıkları çalışmada karıştırma süresi arttıkça kül azaltma oranının arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 3.10. Karıştırma süresinin aglomerasyon performansına etkisi

### 3.2.6. Tane Boyutu ve Elek Boyutunun Aglomerasyona Etkisi

Kömür tane boyutunun aglomerasyona etkisi, kullanılan yağ dozajı ve ayırma elek boyutuyla yakın ilişki ve etkileşim içinde olduğundan tane boyutu ve elek boyutunun etkisi farklı yağ dozajlarında birlikte değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Aglomerasyon testlerinde, aglomerat kazanım eleği boyutu olarak maksimum kömür tane boyutu olan 500  $\mu\text{m}$  seçilmiş ve kullanılmıştır. Bununla birlikte tane boyutunun ve aglomerat kazanım eleğinin işlem performansı üzerindeki etkileri incelemek amacıyla 500  $\mu\text{m}$  boyutundaki atık kömür kontrollü bir şekilde 300  $\mu\text{m}$  ve 125  $\mu\text{m}$  boyutlarına öğütülmüştür. Sonrasında aglomerat kazanım eleğinin etkisini belirlemek amacı ile -500  $\mu\text{m}$  boyutundaki atığın kullanıldığı deneylerde elde edilen aglomeratlar 500  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$  ve 850  $\mu\text{m}$  boyutlarındaki eleklerle, -300  $\mu\text{m}$  boyutundaki atığın kullanıldığı deneylerde elde edilen aglomeratlar 300  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  ve 600  $\mu\text{m}$  boyutundaki eleklerle ve -125  $\mu\text{m}$  boyutundaki atığın ise kullanıldığı deneylerde elde edilen aglomeratlar 125  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  ve 500  $\mu\text{m}$  boyutundaki eleklerle kazanılmıştır. Testler dört farklı yağ dozajı için tekrarlanmıştır.



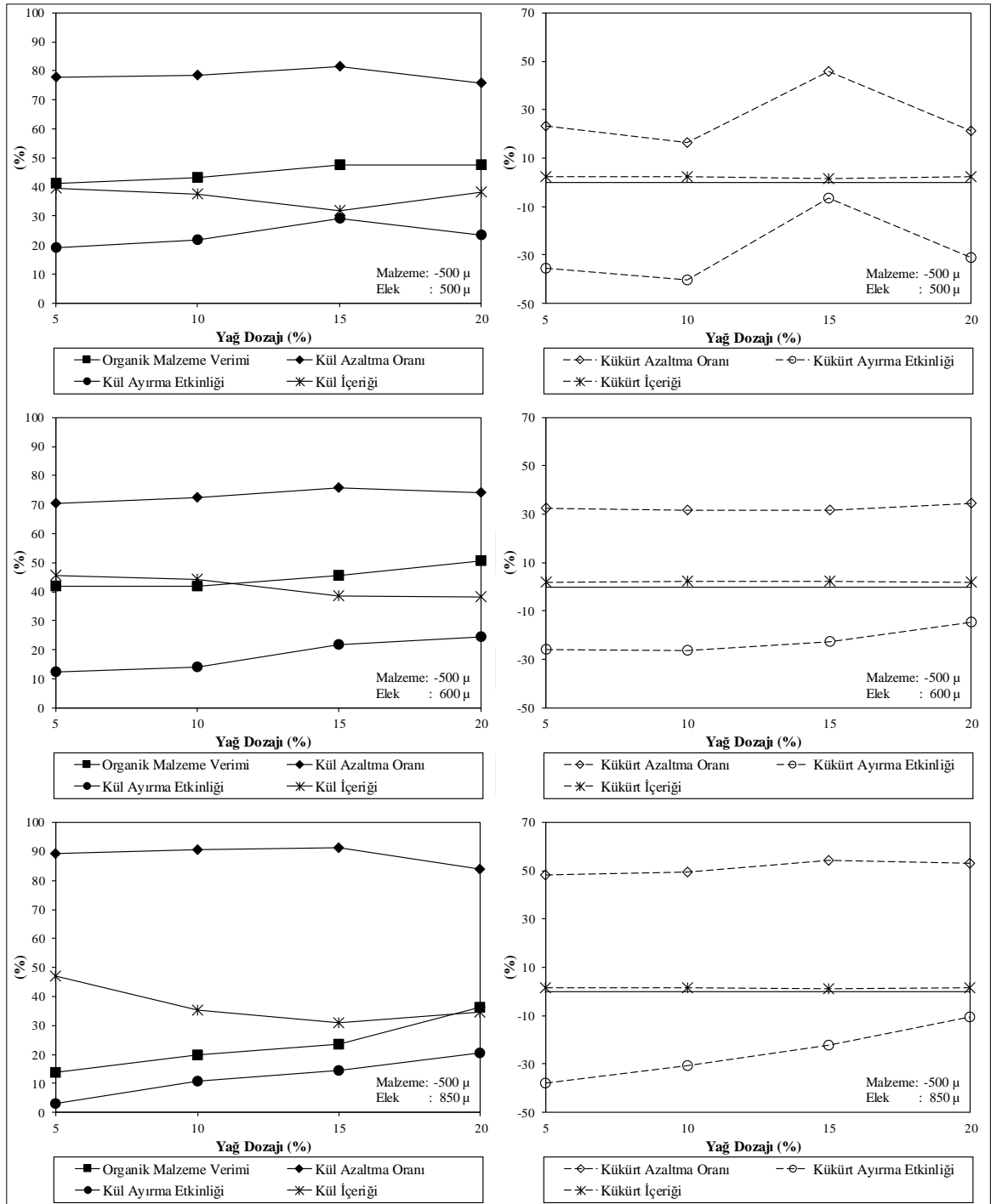
Kömür tane boyutunun, aglomerat kazanım elek boyutu ve yağ dozajıyla beraber aglomerasyon işlemine etkisi Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de gösterilmektedir.

-500  $\mu\text{m}$ 'lik elek ile yapılan deneylerde aglomerat kazanım eleği olarak 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek yerine 600  $\mu\text{m}$  ve 850  $\mu\text{m}$ 'lik elekler kullanıldığında organik malzeme verimleri giderek düşmektedir. Çünkü teorik olarak kazanım eleği boyutu arttıkça göreceli olarak aglomeratların her bir eleğin üzerinde kalabilmesi için gerekli olan boyutlarının da artması gerekmektedir. Sonuçta, büyük delik boyutlu aglomerat kazanım eleklerinde daha fazla aglomerat delikten geçerek kaybedilmektedir. 850  $\mu\text{m}$  delik boyutlu aglomerat kazanım eleği kullanıldığında elde edilen organik malzeme verimi, 500  $\mu\text{m}$ 'lik elekte elde edilene göre %25 daha düşük olmaktadır.

Her bir aglomerat kazanım eleği boyutunda yağ dozajı artışıyla beraber organik malzeme verimi yükselirken bu artış miktarı aglomerat kazanım eleği boyutu arttığında oluşan organik malzeme verimindeki düşüşü karşılamamaktadır. %15 yağ oranında 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığı zaman %47,6 olan organik malzeme verimi 600  $\mu\text{m}$ 'lik aglomerat kazanım eleğinde %45,7'ye ve 850  $\mu\text{m}$ 'lik aglomerat kazanım eleği ile %23,4'e düşmüştür.

Aglomerat kazanım eleği boyutunun artışıyla birlikte genel olarak kül azaltma oranı artmaktadır. %15 yağ oranında 500  $\mu\text{m}$ 'lik aglomerat kazanım eleği kullanıldığında %81,5 olan kül azaltma oranı 850  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığı zaman %91,2'ye yükselmektedir. Bunun sebebi büyük delikli aglomerat kazanım eleği boyutunda yıkama veriminin artmasıdır. Yağ miktarı %20'e ulaştığında ise yağın seçimliliğini kaybetmesi sebebiyle kül uzaklaştırma oranı düşmektedir. Yavuz ve Uslu (2002) yaptıkları çalışmada benzer şekilde elek delik boyutu büyüdükçe organik malzeme verimi düşerken kül azaltma oranının yükselerek daha temiz aglomeratlar kazandıklarını belirtmişlerdir.

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi her bir elek boyutunda kül azaltma oranında olduğu gibi yağ oranı arttıkça kükürt azaltma oranı belli bir noktaya kadar artmaktadır. -500  $\mu\text{m}$ 'lik malzemenin 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek ile kazanılmasında kükürt azaltma oranı yağ dozajıyla ilişkili olarak %16,5-45,9 arasında değişirken 600  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %31,8-34,6 arasında, 850  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığı zaman %48,3-54,3 aralığında değişim göstermektedir. Yani 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek yerine 850  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanılmasıyla %20 daha fazla kükürt uzaklaştırılmış olmaktadır. Kül azaltma oranında olduğu gibi, aglomerat kazanım elek deliklerinin büyümesiyle beraber yıkama veriminin artması ile aglomeratların kükürt içerikleri de azalmaktadır.



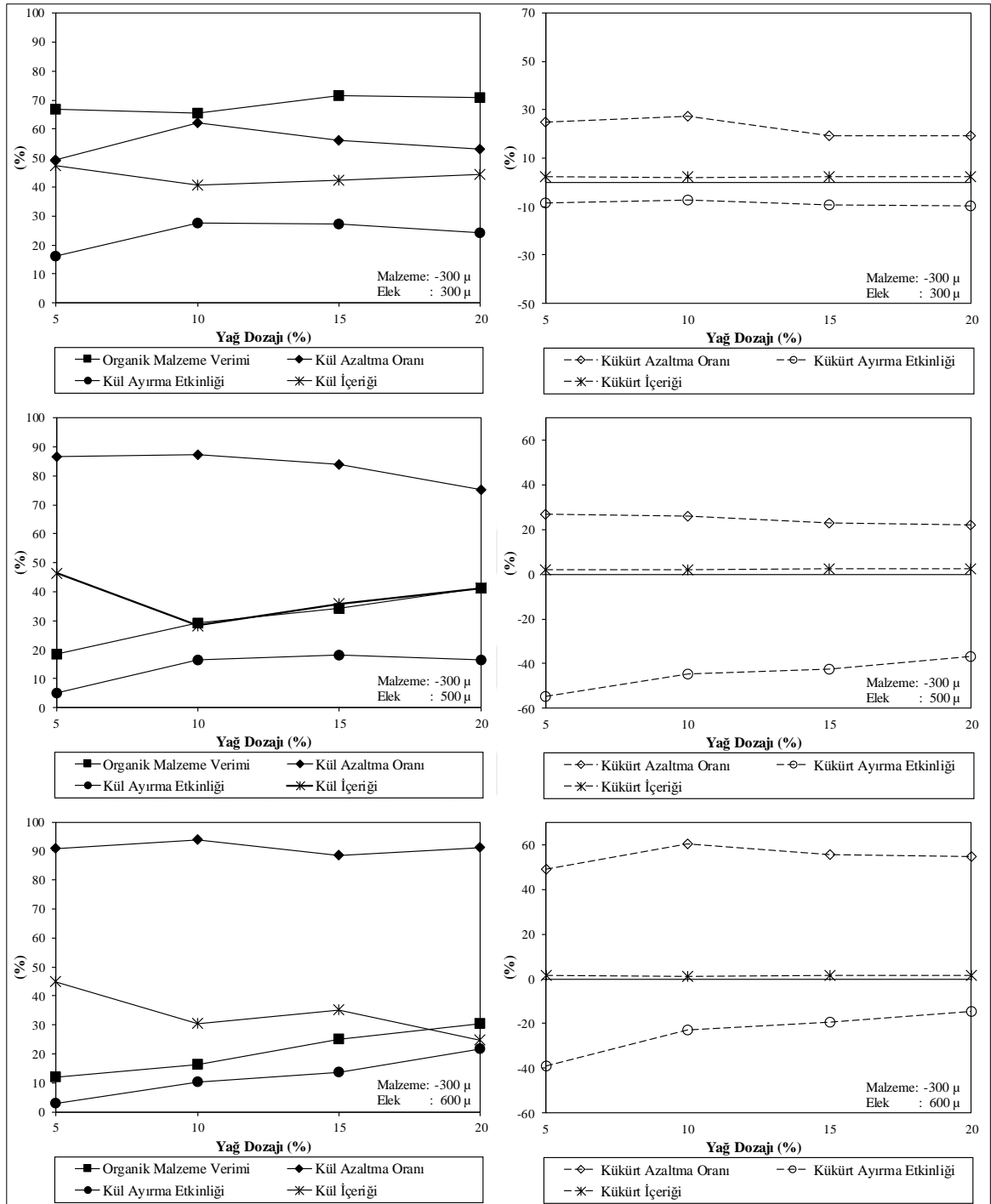
Şekil 3.11 Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansına etkisi (kömür tane boyutu: -500µm)

-300 µm'lik atık kömür ile yapılan deneylerde aglomerat kazanım eleği olarak 300 µm'lik elek yerine 600 µm'lik elek kullanılmasıyla maksimum ayırma etkinliğinin elde edildiği koşullar için organik malzeme verimi %70,9'dan %30,3'e düşmüştür. Bunun en önemli nedeni, daha önceden ifade edildiği gibi oluşan aglomeratların daha büyük delikli

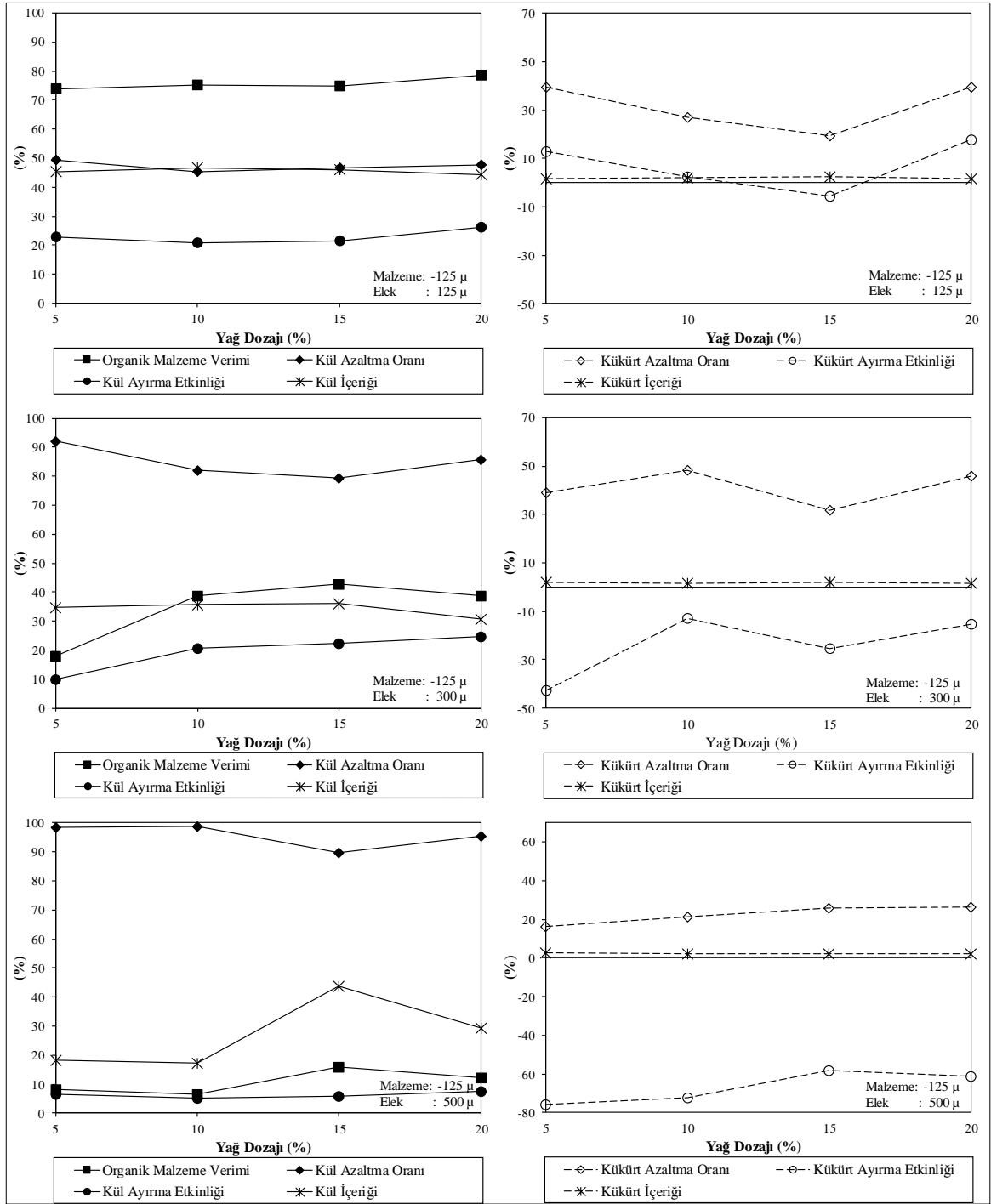
eleklerin üzerinde kalacak kadar büyümemesidir. -300  $\mu\text{m}$ 'lik malzeme 300  $\mu\text{m}$ 'lik elek ile kazanıldığında en düşük yağ oranında (%5 yağ oranı) %66,8 organik malzeme verimi elde edilebilirken 500  $\mu\text{m}$ 'lik ve 600  $\mu\text{m}$ 'lik eleklerle aynı koşullarda sırasıyla %18,3 ve %12,0 organik malzeme verimi elde edilmiştir. 500  $\mu\text{m}$ 'lik ve 600  $\mu\text{m}$ 'lik aglomerat kazanım eleklerinde en yüksek yağ oranında (%20 yağ oranı) en fazla sırasıyla %41,2 ve %30,3 organik madde verimi elde edilebilmiştir. -300  $\mu\text{m}$ 'lik atık kömürle yapılan aglomerasyon testlerinde elde edilen aglomeratların yağ dozajının artmasına rağmen daha büyük delikli eleklerin üzerinde kalacak kadar büyümediği ve en iyi koşullarda bile aglomeratların %50'den fazlasının kaybedildiği tespit edilmiştir.

En yüksek kül azaltma oranları 300  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %62,2, 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %87,4 ve 600  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %94,0'a ulaşmıştır. Bunun sebebi, elek gözenek açıklığı arttıkça oluşan aglomeratların daha iyi yıkanmasıdır ve bu sayede daha az küllü ürün elde edilirken daha yüksek kül azaltma oranlarının elde edilmesidir. -300  $\mu\text{m}$ 'lik atığın kükürt azaltma oranı yağ dozajıyla ilişkili olarak 300  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %19,5-27,4 aralığında, 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %22,2-26,9 aralığında ve 600  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %49,0-60,6 aralığında değişmektedir. Diğer bir ifadeyle 300  $\mu\text{m}$ 'lik elek yerine 600  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanılmasıyla kükürt azaltma oranı iki katından fazla artmıştır (Şekil 3.12).

-500  $\mu\text{m}$  ve -300  $\mu\text{m}$  tane boyutlarında olduğu gibi -125  $\mu\text{m}$  tane boyutlu kömür kullanıldığında yapılan deneylerde de elek boyutunun giderek artmasıyla organik malzeme verimi düşerken daha temiz kömür elde edilmiştir. Yağ oranının artışı organik malzeme verimindeki düşüşe engel olamamıştır. Aglomeratları kazanmak için 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanılmasıyla organik malzeme verimi ortalama %10 gibi çok düşük bir seviyede kalmıştır (Şekil 3.13). Elek açıklığının çok yüksek olmasından kaynaklı olarak oluşan aglomeratlar, elek yüzeyinde yeterince iyi yıkanabildikleri için kül yapıcı bölümün çok büyük bir çoğunluğu uzaklaştırılmıştır. Şahinoğlu ve Uslu (2008) ve Mustafa vd. (2016) benzer şekilde aynı aglomerat kazanım elekleri için kömür boyutunun küçülmesiyle beraber organik malzeme veriminin düştüğünü ve daha az küllü konsantre elde ettiklerini belirtmişlerdir. -125  $\mu\text{m}$ 'lik atığın kükürt azaltma oranı yağ dozajıyla ilişkili olarak 125  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %19,5-39,4 aralığında, 300  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %31,8-48,3 aralığında ve 500  $\mu\text{m}$ 'lik elek kullanıldığında %16,2-26,6 aralığında değişmektedir.



Şekil 3.12. Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansına etkisi (kömür tane boyutu: -300 µm)



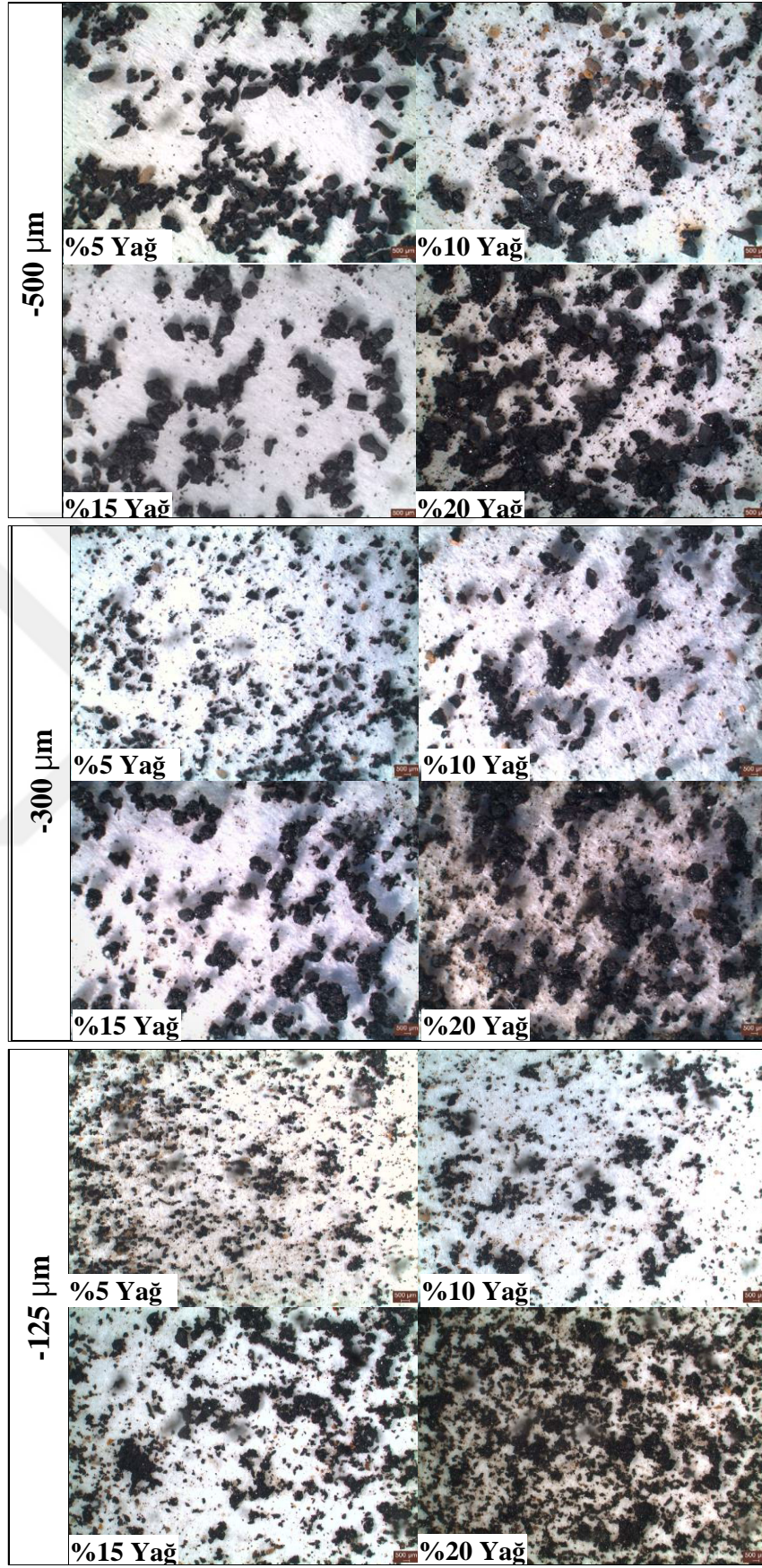
Şekil 3.13. Aglomerat kazanım elek boyutunun aglomerasyon performansına etkisi (kömür tane boyutu: -125 µm)

300 µm'luk atık ile yapılan aglomerasyon deneyleri sonucu oluşan aglomeratların 300 µm eleği ile kazanıldığı deneyler ile -500 µm boyutundaki malzeme ve 500 µm elek ile yapılan deneyler karşılaştırıldığında küçük tane boyutlarında organik malzeme verimi artarken kül azaltma oranında da düşüşler gözlemlenmektedir. Boyut küçültme ile

serbestleşen kömür miktarının artmasıyla kazanılan aglomerat miktarı da artmıştır. -500  $\mu\text{m}$  boyutundaki malzeme ile yapılan deneylerde aglomeratların bir kısmı +500  $\mu\text{m}$  boyutuna büyümediği için elek altına geçerek kaybedilen çok miktarda aglomerat, 300  $\mu\text{m}$  elek ile kazanılabilmiş ve organik malzeme veriminde ciddi bir artış gözlenmiştir. Kazanılan organik madde miktarındaki artışın aksine kül azaltma oranı düşmüştür. Bunun sebebi, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi elek boyutu düştüğünde aglomerat yıkama veriminin giderek düşmesi, diğer bir ifadeyle mineral maddelerin elekten geçmekte zorlanmasıdır.

-125  $\mu\text{m}$ , -300  $\mu\text{m}$  ve -500  $\mu\text{m}$  boyutundaki atıklar için, maksimum tane boyutlarındaki eleklerin kullanılmasıyla, tane boyutu küçüldükçe kazanılan organik malzeme veriminde ciddi bir artış olmuştur. Bu durumun aksine tane boyutu küçüldükçe kül azaltma oranında ciddi düşüşler gözlenmiştir. Tane boyutunun -500  $\mu\text{m}$ ’den -300  $\mu\text{m}$ ’ye ve -125  $\mu\text{m}$ ’e inmesiyle en yüksek yağ oranında (%20 yağ oranı) organik malzeme verimi sırasıyla %47,5’den %70,9’e ve sonrasında %78,5’a çıkmıştır. Tane boyutu küçüldükçe organik malzeme verimindeki artışın nedeni ortamda daha fazla serbestleşmiş kömür olmasıdır. Beklenenin aksine tane boyutu küçülmesinin kül uzaklaştırmaya negatif etkisinin sebebi ise küçük delikli ayırma eleklerinde aglomerat yıkama işleminin verimsiz oluşudur. Kömür tane boyutundan daha büyük elekler kullanılarak bu sorun aşılmaya çalışıldığında daha temiz kömürler elde edilmesine rağmen organik malzeme verimleri büyük oranda düşmüştür. Chary vd. (2015) kömür tane boyutu küçüldükçe organik malzeme veriminin arttığını ve kül azaltma oranının düştüğünü belirtmişlerdir. Shrauti ve Arnold (1995)’da kömür tane boyutu küçüldükçe organik malzeme veriminin arttığını belirtmişlerdir.

Tane boyu değişimi aglomerat boyutlarını da belirgin bir şekilde etkilemektedir. Tane boyutu arttıkça Şekil 3.14’den görüleceği gibi bütün yağ dozajları için aglomerat boyutları da artmaktadır.



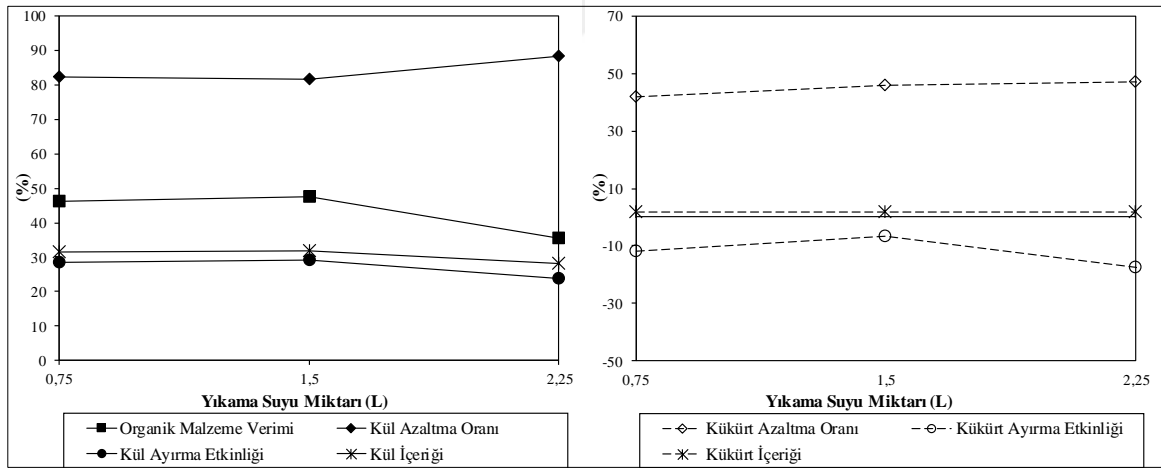
Şekil 3.14. Farklı tane boyutu ve yağ dozajlarında aglomerat görüntüleri



### 3.2.7. Yıkama Suyu Miktarının Aglomerasyona Etkisi

Yağ aglomerasyonu yönteminde, aglomeratların arasındaki ve yüzeyindeki mineral maddelerin uzaklaştırıldığı yıkama aşaması çok önemlidir. Ancak organik malzeme kaybetmeden aglomeratları yıkamak da mümkün değildir. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi yıkama suyu miktarı arttıkça organik malzeme verimi düşmektedir. Yıkama suyu miktarının 0,75 litreden 2,25 litreye çıkmasıyla yaklaşık olarak organik malzemenin 4’de biri kaybedilmektedir.

Organik malzeme verimindeki düşüşün aksine kül ve kükürt azaltma oranı yıkama suyu miktarıyla artmıştır. Yıkama suyu miktarının 0,75 litreden 2,25 litreye çıkmasıyla kül azaltma oranı %82,3’den %88,3’e ve kükürt azaltma oranı %41,7’den %47,2’ye ulaşmıştır. Yıkama suyu miktarı 1,5 litre seviyesindeyken sırasıyla %29,1 ve %-6,5 olan en yüksek kül ve kükürt ayırma etkinliklerine ulaşılmıştır. Daha fazla su kullanılması mineral maddelerin daha fazla ve kolay bir şekilde elekten geçmesini sağlamıştır. Bu sonuçlar literatürdeki daha önce yapılmış çalışmalarla paralellik göstermektedir (Güleç, 1999; Şahinoğlu, 2012).



Şekil 3.15. Yıkama suyu miktarının aglomerasyon performansına etkisi

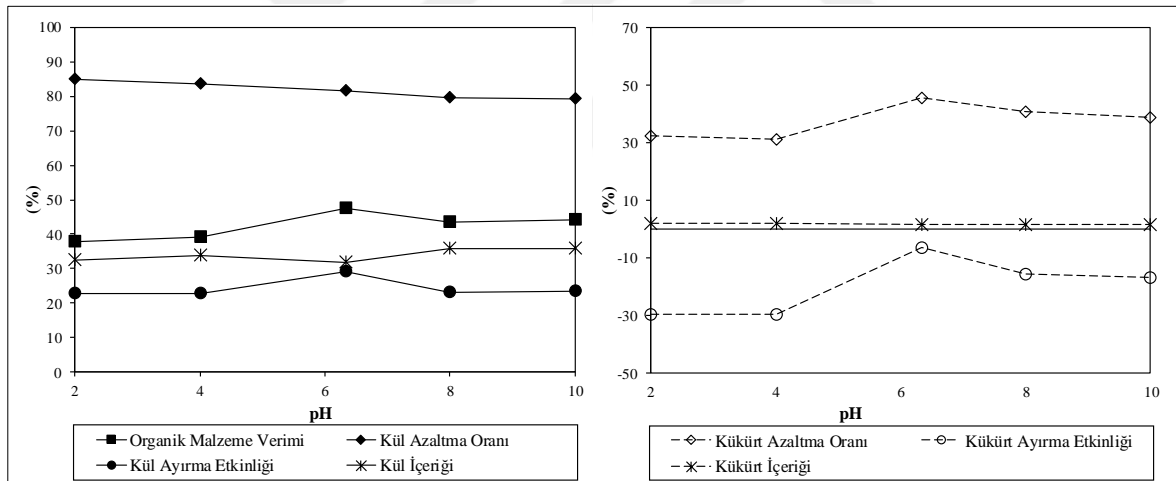
### 3.2.8. Ortam pH’ının Aglomerasyona Etkisi

Çözelti pH’ının asidikten nötr ortama doğru artmasıyla beraber organik malzeme verimi artmaktadır, pH’ın daha da yükselmesi organik malzeme verimini olumsuz yönde etkilemektedir. En yüksek organik malzeme verimi ortamın doğal pH’ında (pH: 6,34) %47,6



olarak elde edilmiştir. Bunun sebebi bazik ortamlarda kömür yüzeyi ve yağ damlacıklarının normalden daha fazla negatif yüklenmesiyle birbirlerini itme kuvvetlerinin artmasıdır. Bu durumda, kömür tanecikleri ile yağ damlacıklarının temas etme ihtimali düştüğü için organik malzeme verimi de olumsuz etkilenmiştir. Bazik koşullarda kömür taneciklerinin negatif yüklenmesi ile kömür tanecikleri arasındaki etkileşimde olumsuz etkilenmektedir (Şekil 3.17). Temel ve Ayhan (2006) ve Cebeci vd. (2002)'nin yaptıkları çalışmalarda organik malzeme veriminin pH'ın bazik bölgede artmasıyla azaldığını vurgulanmıştır.

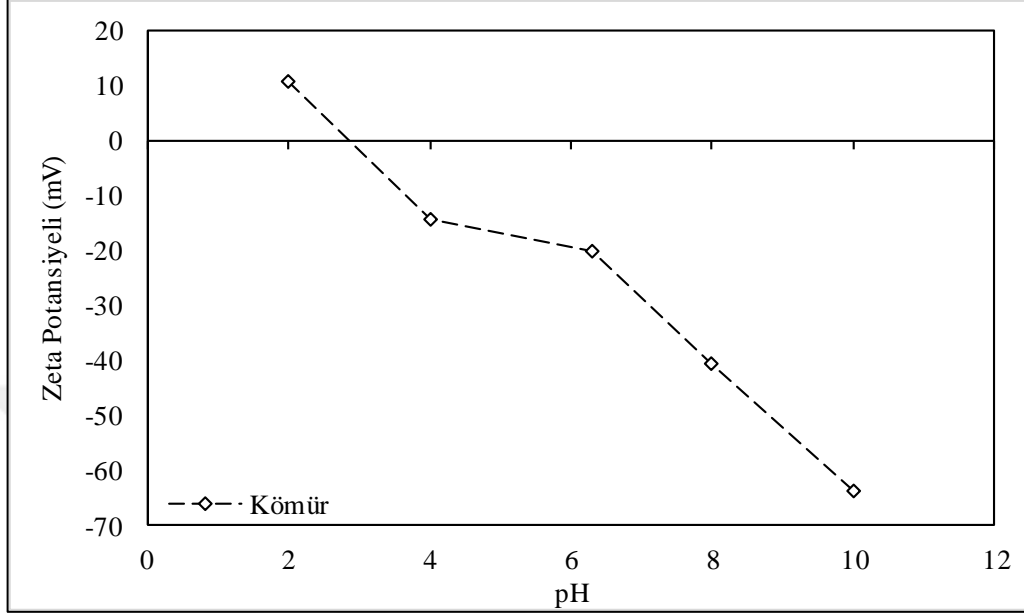
Ortam pH'nın asidik durumdan bazik duruma doğru değişimi kül azaltma oranını olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun sebebi tanecik yüzeylerindeki itici kuvvetin artmasından dolayı yöntemin seçimliliğinin azalmasıdır. Çözeltinin doğal pH (6,34) değerinde sırasıyla %29,1 ve %-6,5 olan en yüksek kül ve kükürt ayırma etkinliğine ulaşılmıştır. Bu sonuçlara bakılarak, Tunçbilek lavvar atıklarından ince kömürlerin yağ aglomerasyonu yöntemiyle kazanılmasında ortamın doğal pH'nın (6,34) en uygun koşul olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 3.16. Ortam pH'nın aglomerasyon performansına etkisi

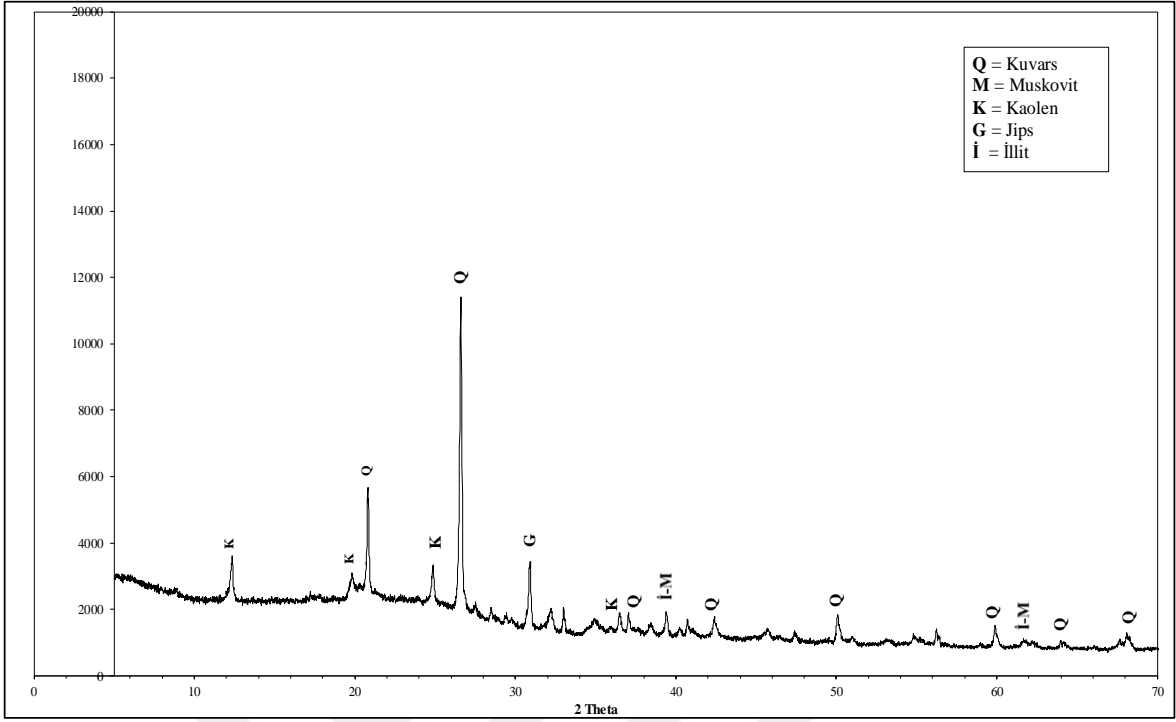
Şekil 3.16'dan görülebileceği gibi kükürt azaltma oranı doğal ortam koşullarında ve alkali koşullarda asidik koşullara göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Asidik koşullarda maksimum %32,4 kükürt azaltma oranı elde edilirken, doğal ve alkali koşullarda kükürt azaltma oranı %39,1- 45,9 değerleri arasında değişmektedir. Yüksek pH değerlerinde kükürt azaltma oranının artma nedeni pirit minerallerinin yüzeyindeki demiroksitlerin yüksek pH değerlerinde hidrofilik özellik göstermesidir. Kawatra ve Eisele (2001) asidik koşullarda

piritin hidrofobitesinin yüksek olmasından dolayı, yağ aglomerasyonunun alkali koşullarda seçimliliğin artarak, temiz ürüne pirit kaçmasının önlendiğini belirtmiştir.

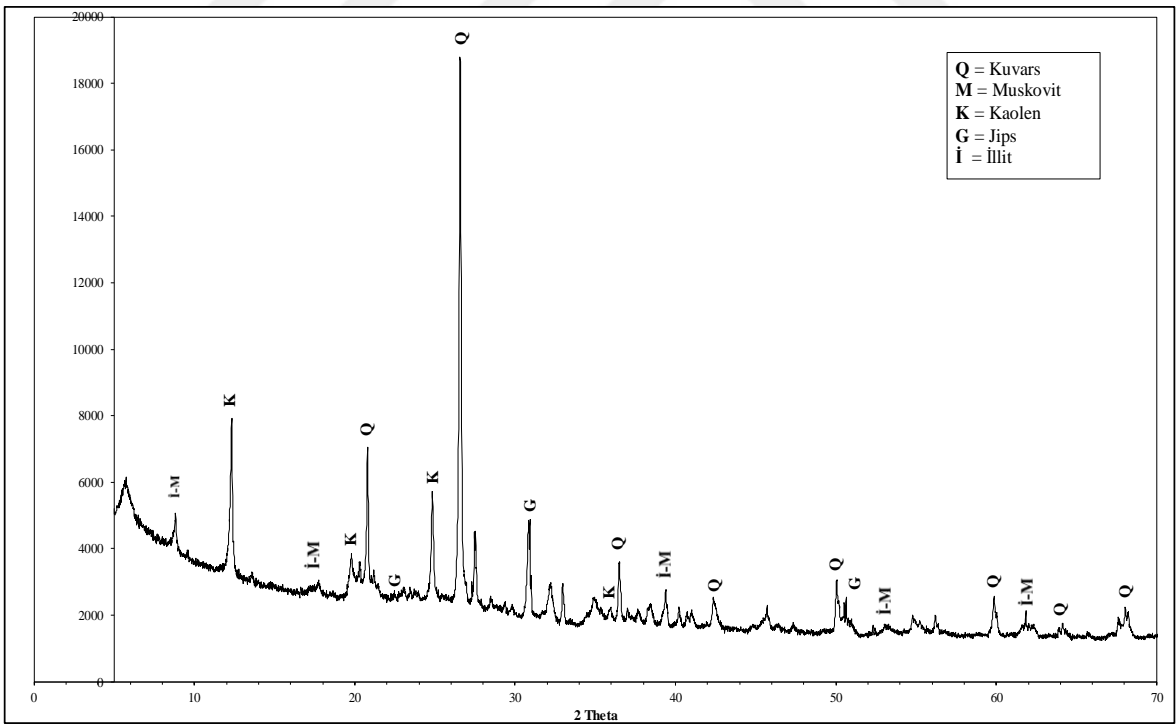


Şekil 3.17. Ortam pH'ının kömürün zeta potansiyeline etkisi

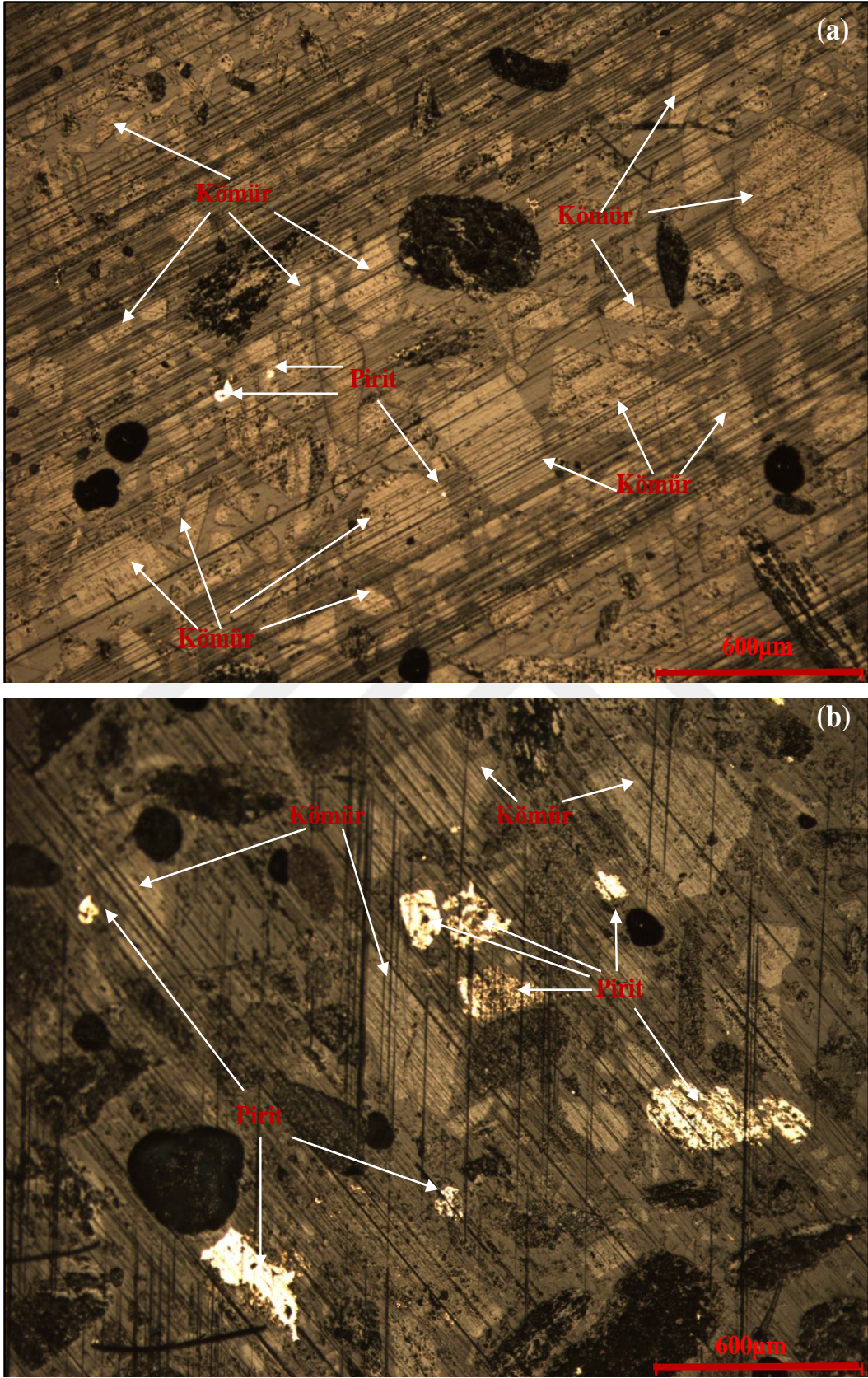
Aglomerasyona etki eden farklı parametrelerin incelenmiş olduğu testler sonucunda optimum olarak (maksimum kül ayırma etkinliğinde), temiz kömürün kül oranının %31,8 olduğu ve %47,6 organik malzeme verimi ile elde edildiği görülmüştür. Kül ve kükürt azaltma oranları sırasıyla %81,5 ve %45,9 olup, elde edilen temiz kömürün kalorifik değeri 4758,8 kcal/kg'dır. Bu sonucun desteklenmesi amacıyla XRD, SEM-EDS ve parlak kesit incelemesi yapılmıştır. Konsantre ve atığın XRD analizlerinden görüleceği üzere önemli miktarda mineral madde uzaklaştırılarak temiz kömür elde edilmiştir (Şekil 3.18 ve Şekil 3.19). Şekil 3.20'da görülen konsantre ve atığın parlak kesit incelemesinden, kömürden oldukça fazla miktarda piritin uzaklaştırıldığı anlaşılmaktadır. Konsantre ve atığın SEM-EDS analizinde gang minerallerin büyük bölümünün atıkta toplandığı görülmektedir (Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Tablo 3.1).



Şekil 3.18. Temiz kömürün XRD analizi

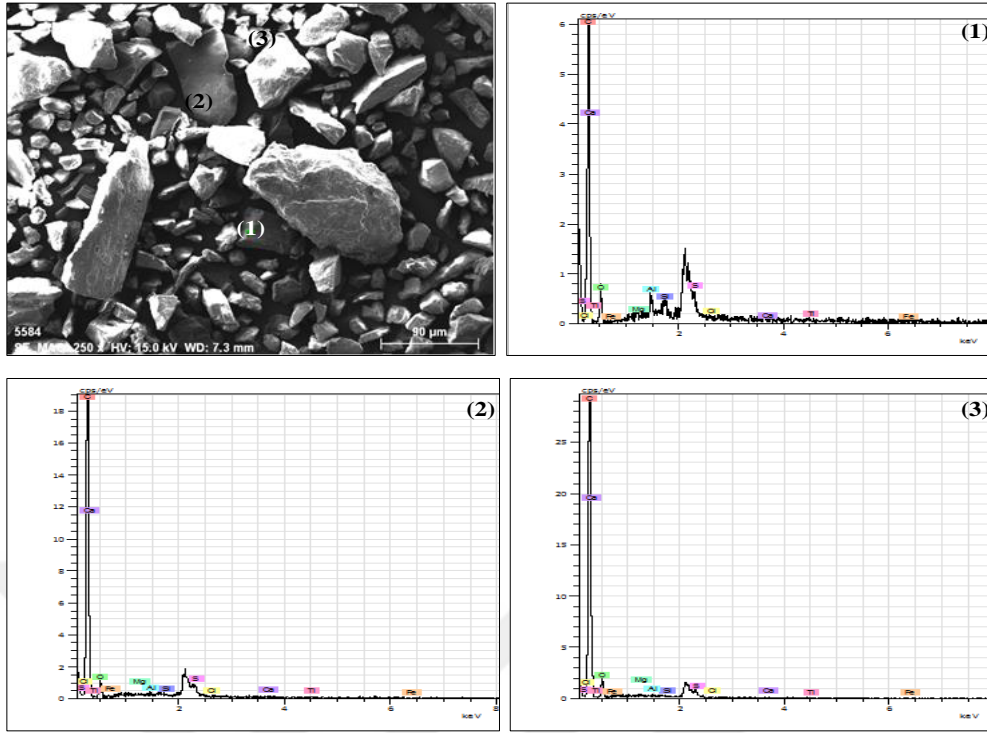


Şekil 3.19. Atığın XRD analizi

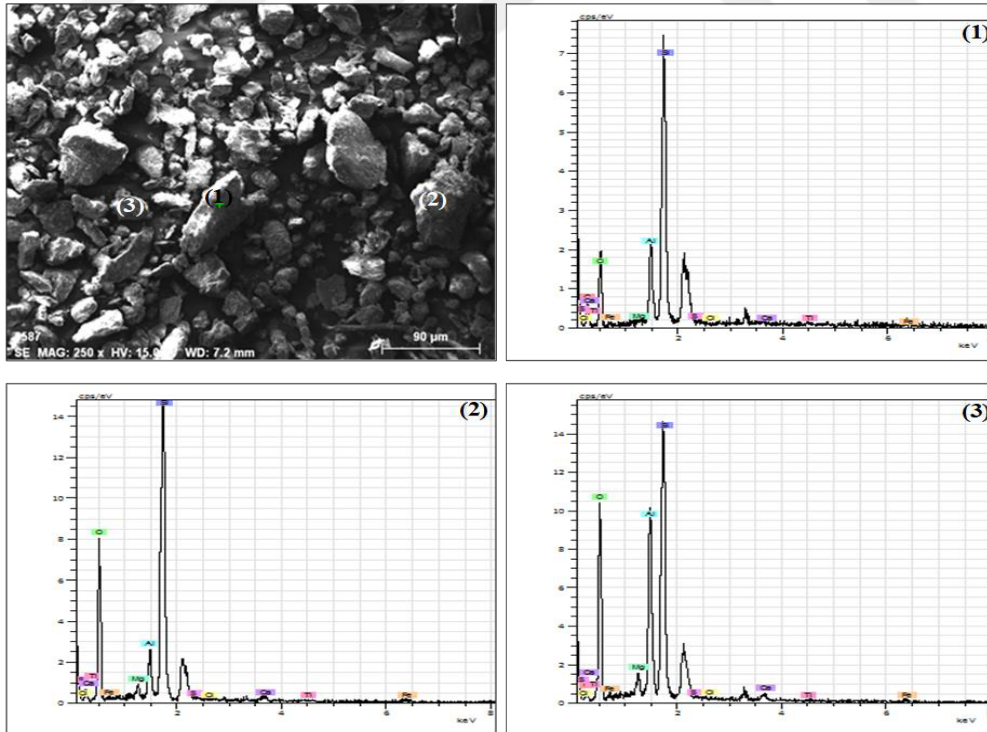


Şekil 3.20. (a) Konsantrenin parlak kesit görüntüsü, (b) Atığın parlak kesit görüntüsü





Şekil 3.21. Temiz kömürün SEM-EDS analizi



Şekil 3.22. Atığın SEM-EDS analizi

Tablo 3.1. Temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi

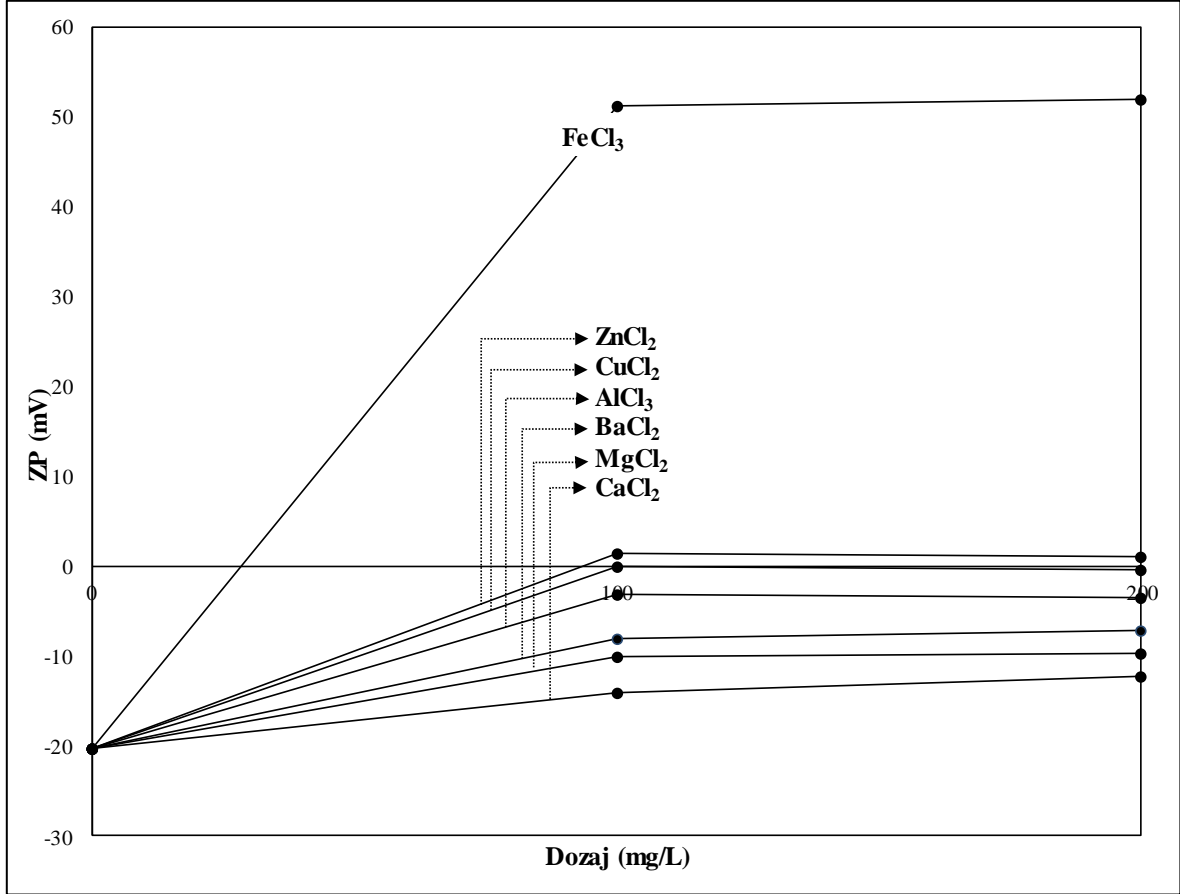
Element (%)	Temiz Kömür			Atık		
	1	2	3	1	2	3
C	62,13	68,45	67,49	11,26	3,35	3,30
O	30,46	26,74	27,74	44,54	68,28	57,77
Al	0,72	0,10	0,08	7,01	2,42	10,87
Si	1,02	0,18	0,10	26,66	18,52	19,84
S	3,34	2,74	2,49	5,93	2,11	3,40
Fe	1,11	0,75	0,96	2,1	0,62	1,62
Mg	0,25	0,06	0,10	0,56	0,65	1,19
Ca	0,36	0,27	0,39	0,71	0,52	1,01

### 3.2.9. Tuzların Aglomerasyona Etkisi

Bu çalışmada elde edilen organik malzeme verimlerini ve kül-kükürt uzaklaştırma oranlarını arttırmak amacıyla çeşitli tuzlar kullanılmıştır. Aglomerasyon deneylerinin sonuçları Şekil 3.25-32’de gösterilmiştir. Farklı tuzların kullanımıyla organik malzeme verimlerinde artışlar gözlenmiştir. Tuz kullanılmadığı durumda %47,6 olan organik malzeme verimi  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$ , ve  $\text{FeCl}_3$  tuzlarının kullanılmasıyla maksimum olarak sırasıyla %58,9, %67,2, %68,0, %64,6, %59,3, %63,9, ve %57,5’e yükselmiştir. Tuzların düşük dozajlarda kullanılması organik malzeme verimini arttırmasına rağmen dozaj artışları organik malzeme veriminde ilave artışlar sağlamamıştır. Tuzların kullanılmasıyla kömür kazanma verimindeki artışı açıklayan teorilerden birinde, elektrolitlerin varlığında kömür yüzeyine adsorblanan hidratlanmış tabakaların kararsızlaştığı ve kömür hidrofobitesinin arttığı ileri sürülmektedir. Diğer bir teoride ise elektrolitlerin elektriksel çift tabakayı sıkıştırması, parçacıkların zeta potansiyelini azaltması ve parçacıklar arası elektrostatik kuvvetlerin etkinliğini azaltması sebebiyle kömür kazanma veriminin arttığı bildirilmektedir (Paulson ve Pugh, 1996; Ozdemir, 2013; Zhang, 2014). Tuzların bu etkileri sayesinde negatif potansiyele sahip yağ damlacıkları ile negatifliği azalan kömür tanelerinin temas olasılığı artmıştır.

Şekil 3.23’den kullanılan tuzların zeta potansiyeline olan etkisi görülebilir. Tuz kullanılmadığında -20,2 olan zeta potansiyeli,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,

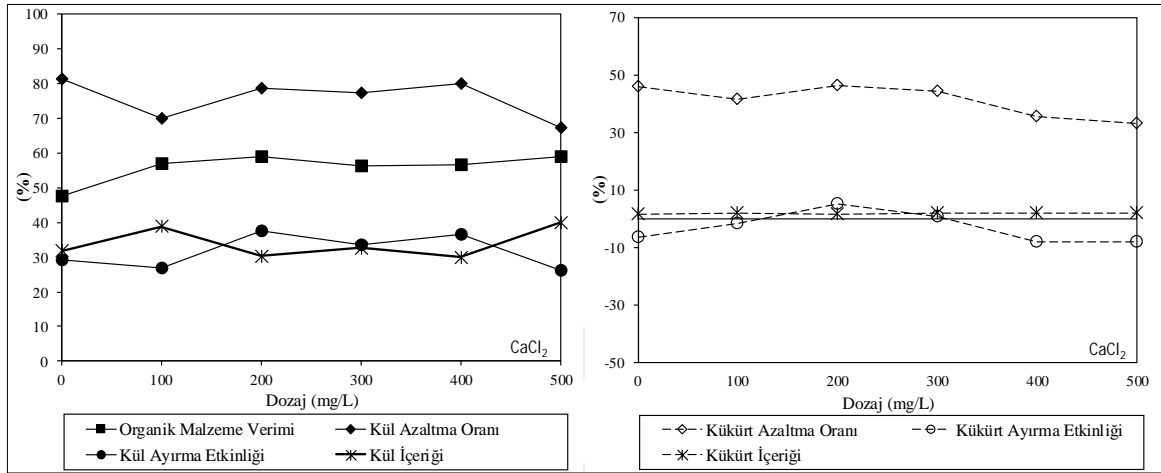
ve  $\text{FeCl}_3$  tuzlarının kullanılmasıyla -10,0, -8,1, -14,1, 0,1, 1,4, -3,2, 51,1 değerlerine ulaşmıştır.



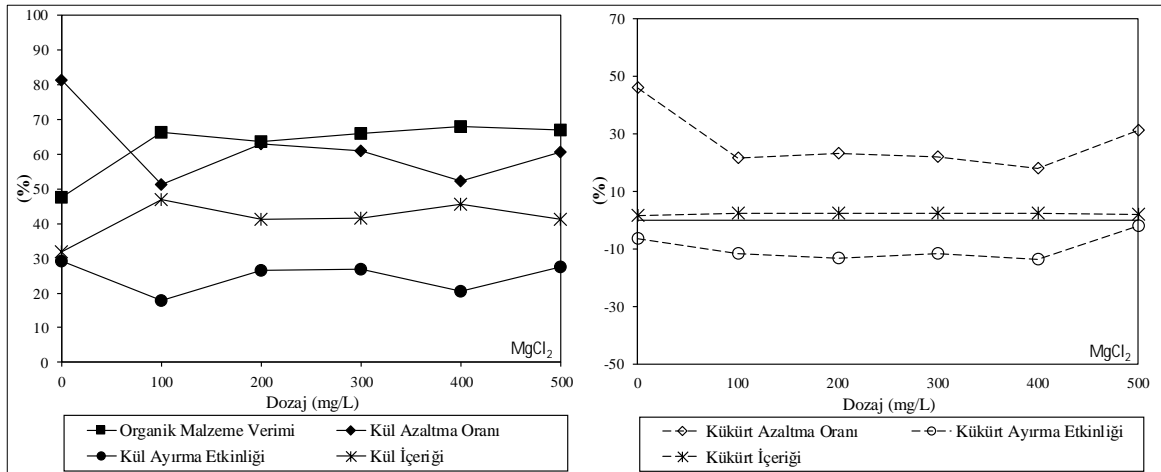
Şekil 3.23. Farklı tuzların kömürün zeta potansiyeline etkisi

Aglomerasyon deneylerinde  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$  ve  $\text{FeCl}_3$  tuzlarının kullanılmasıyla kül azaltma oranında çok belirgin bir etki gözlenmemiştir.  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  ve  $\text{CuCl}_2$  tuzlarının kullanılmasının ise kül azaltma oranını olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Tuz kullanılmadığında elde edilen kül azaltma oranı %81,5 iken  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$  ve  $\text{FeCl}_3$  tuzlarının kullanılmasıyla sırasıyla %79,9, %82,3, %57,4, %62,9, %72,7 %82,1 ve %80,6'lık kül azaltma oranları elde edilmiştir. Cebeci vd. (2002) yaptıkları çalışmada  $\text{FeCl}_3$  tuzunun dozajı arttıkça ilk başta mineral madde ve kömür çevresindeki elektiriksel çift tabakanın küçülmesiyle aralarındaki çekim kuvvetimin artmasından dolayı konsantrenin kül içeriğinin arttığını fakat belli bir dozajdan sonra yağ damlacıkları ve mineral maddelerin arasındaki itici güçlerin artmasıyla birlikte konsantrenin kül içeriğinin düştüğünü belirtmişlerdir. Chen vd. (2013) yaptıkları aglomerasyon çalışmasında tuz olarak

$\text{CuSO}_4$  kullanıldığında elde edilen konsantrenin yüksek kül içerikli olduğunu belirtmişlerdir. Bunun sebebinin  $\text{Cu}^{+2}$  iyonlarının kömür yüzey özelliklerini değiştirerek daha hidrofilik yapmasıyla açıklamaktadırlar. Gürses vd. (1997) benzer şekilde  $\text{FeCl}_3$ 'ün zeta potansiyelini artırarak konsantrenin kül içeriğini düşürdüğünü rapor etmişlerdir.

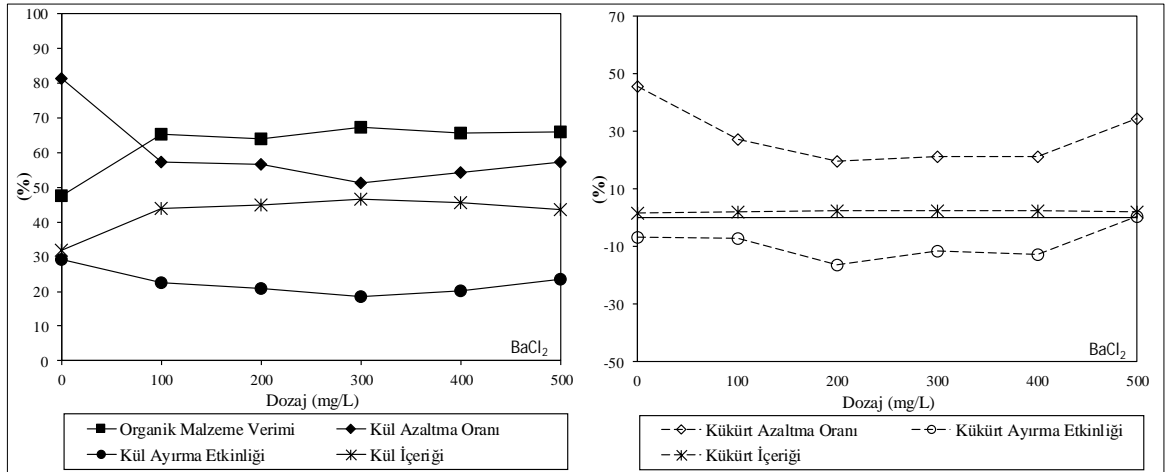
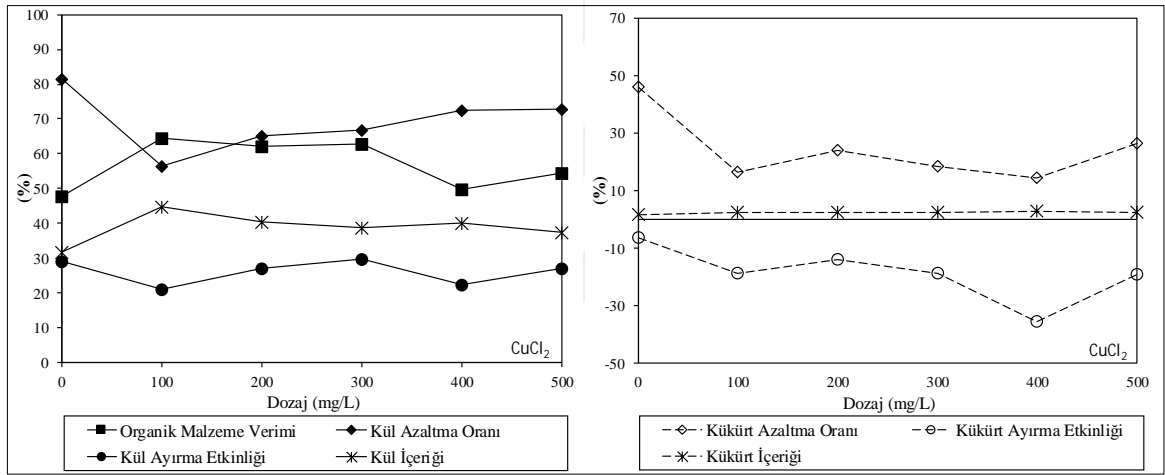
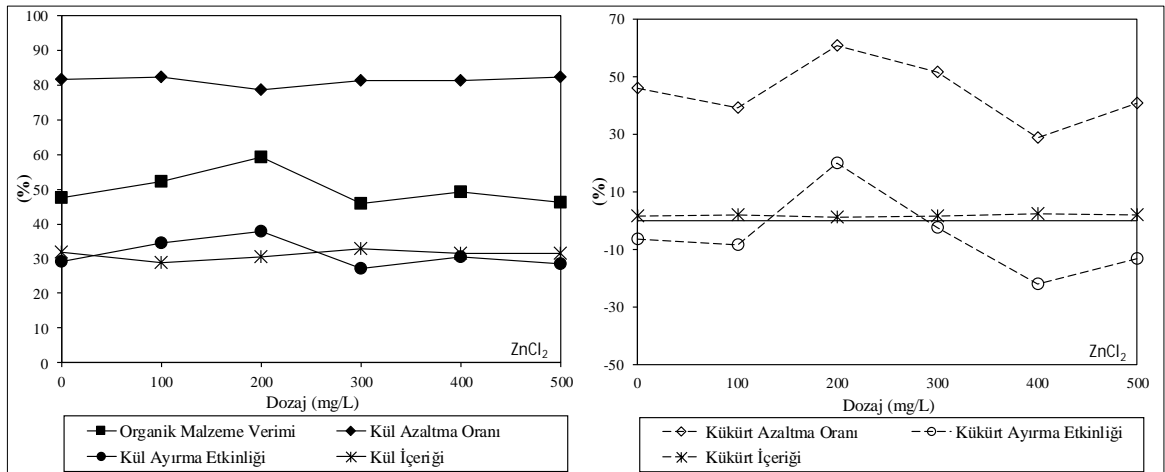


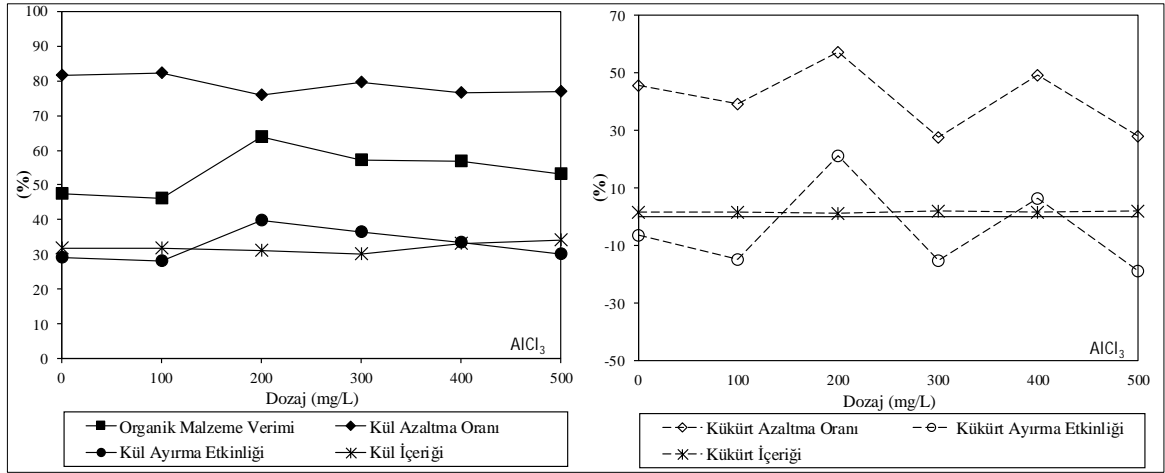
Şekil 3.24.  $\text{CaCl}_2$  tuzunun aglomerasyon performansına etkisi



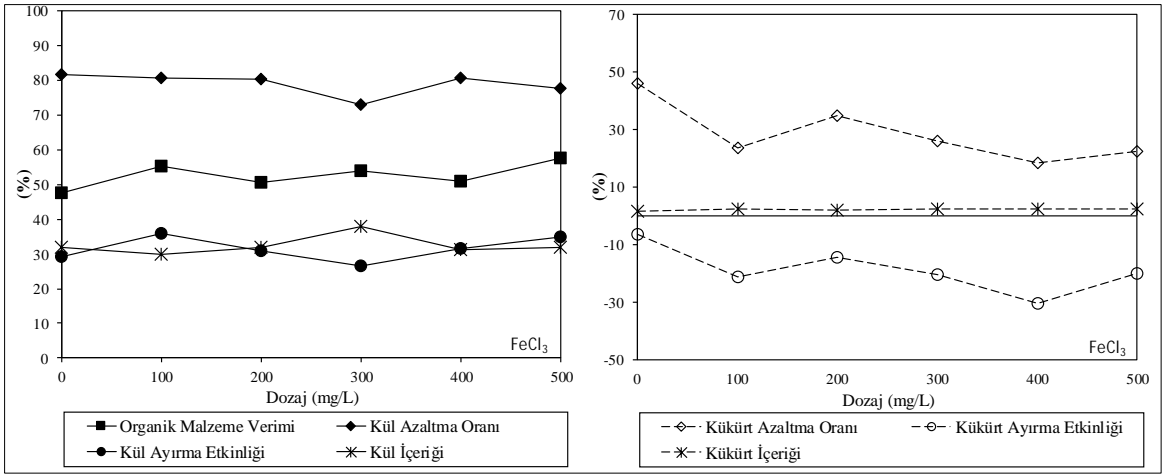
Şekil 3.25.  $\text{MgCl}_2$  tuzunun aglomerasyon performansına etkisi



Şekil 3.26.  $BaCl_2$  tuzunun aglomerasyon performansına etkisiŞekil 3.27.  $CuCl_2$  tuzunun aglomerasyon performansına etkisiŞekil 3.28.  $ZnCl_2$  tuzunun aglomerasyon performansına etkisi



Şekil 3.29. AlCl<sub>3</sub> tuzunun aglomerasyon performansına etkisi

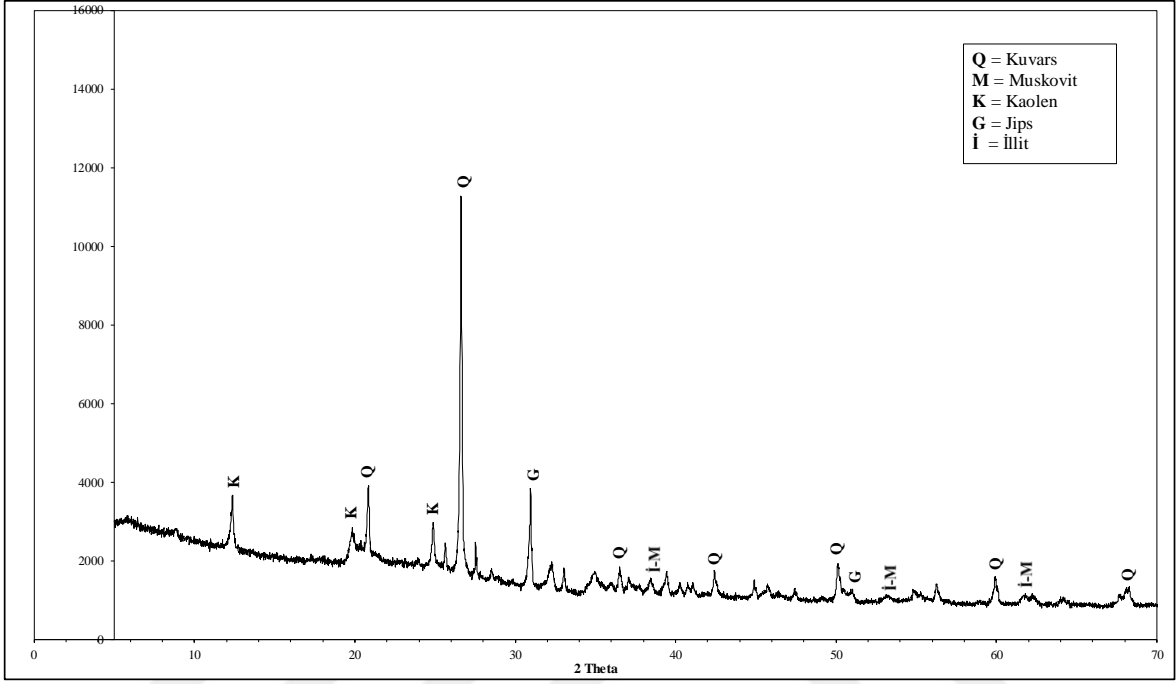


Şekil 3.30. FeCl<sub>3</sub> tuzunun aglomerasyon performansına etkisi

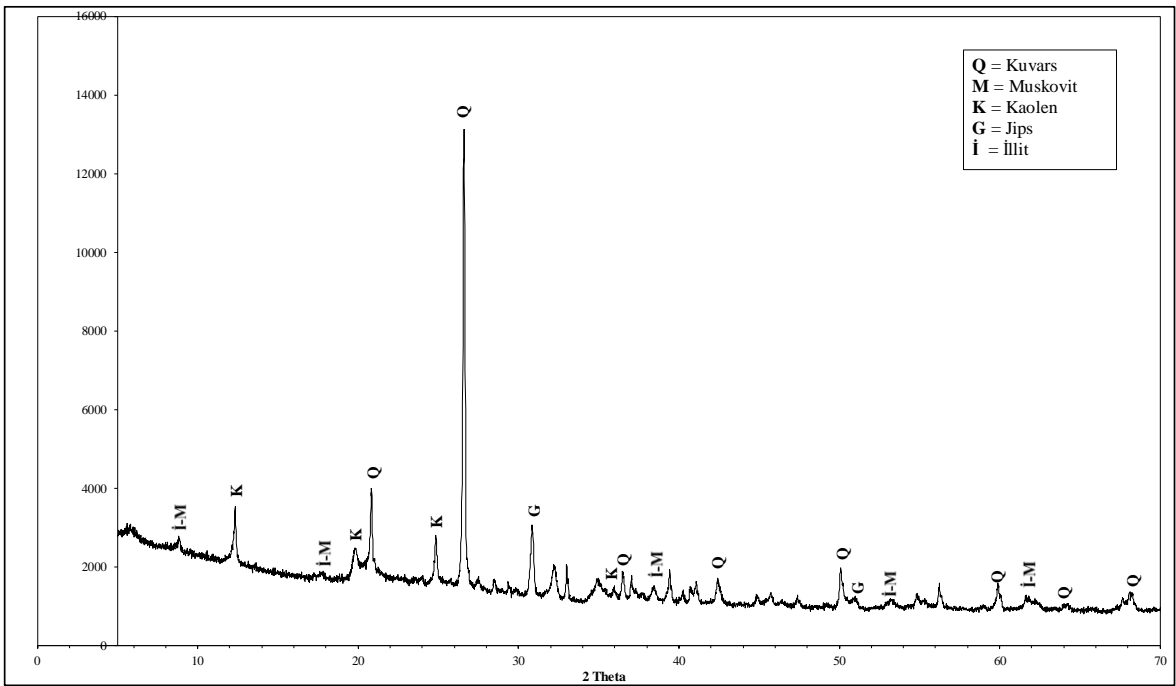
Aglomerasyon deneylerinde CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub> ve AlCl<sub>3</sub> tuzlarının kullanılmasıyla kükürt azaltma oranının arttığı ve BaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CuCl<sub>3</sub> ve FeCl<sub>3</sub> tuzlarının kullanılmasının ise kükürt azaltma oranını azalttığı gözlenmiştir. Tuz kullanılmadığında elde edilen kükürt azaltma oranı %45,9 iken, CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, AlCl<sub>3</sub>, BaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CuCl<sub>2</sub> ve FeCl<sub>3</sub> tuzlarının kullanılmasıyla sırasıyla %46,4, %60,6, %57,3, %34,6, %31,1, %26,5 ve %34,8 olarak elde edilmiştir. Temel ve Ayhan (2006) yaptıkları çalışmada benzer şekilde MgCl<sub>2</sub> tuzunun kullanılmasıyla beraber kükürt azaltma oranının düştüğünü tespit etmişlerdir.

Kül ayırma etkinliği açısından en iyi sonucun elde edildiği tuz AlCl<sub>3</sub>'dür. Bu tuz kullanıldığında %75,9 kül azaltma oranı ve %57,3 kükürt azaltma oranı ile %31,2 kül içerikli, %1,3 kükürt içerikli ve 3672 kcal/kg ısıl değerli temiz kömür %63,9 organik

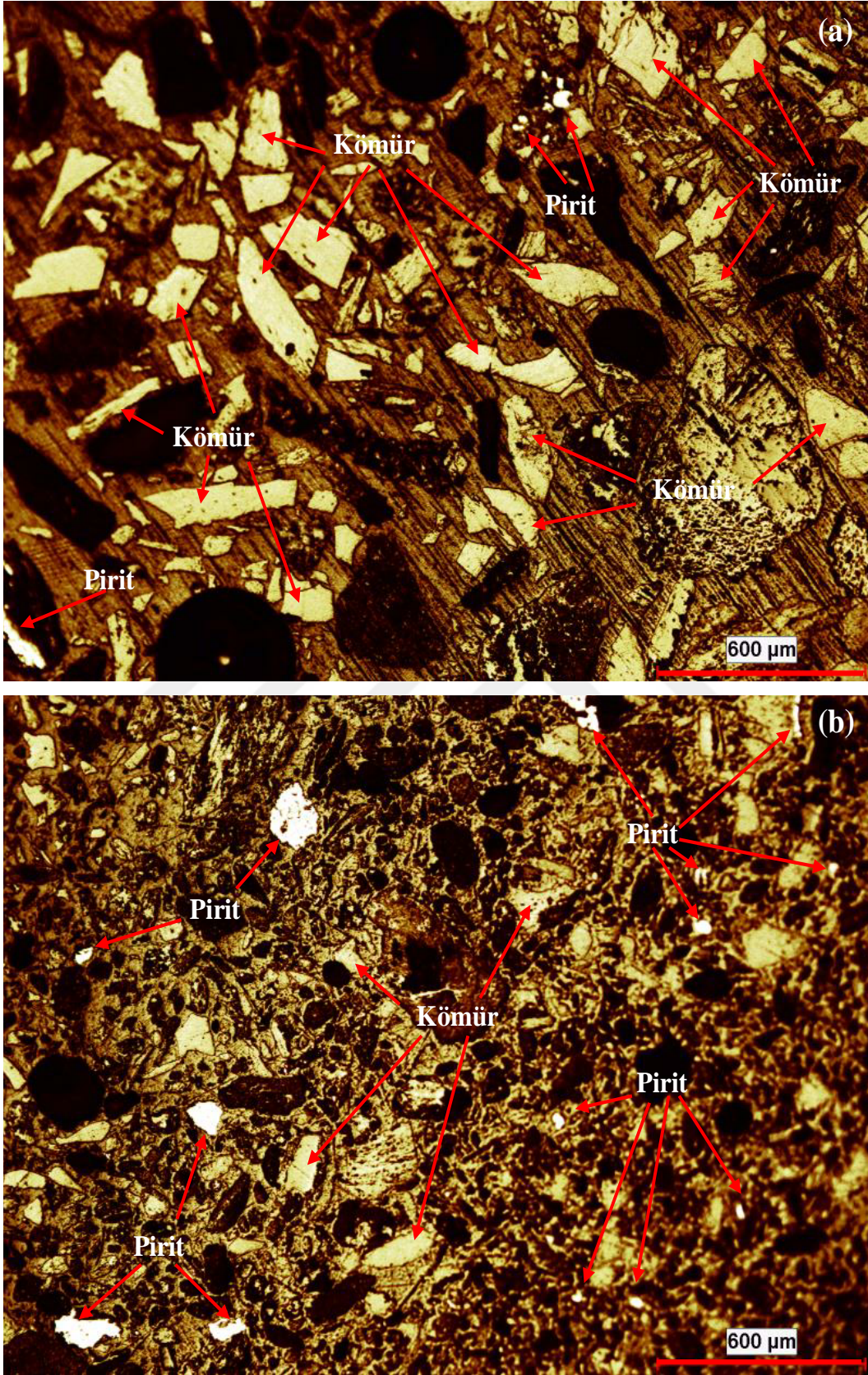
malzeme verimi ile kazanılmıştır. Temiz kömür ve atık üzerinde yapılan SEM-EDS, parlak kesit ve XRD incelemeleri sırasıyla Şekil 3.31-35’de ve Tablo 3.2’de görülmektedir. Görüleceği üzere başarılı bir kömür-mineral madde ayırımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.31.  $\text{AlCl}_3$  tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömürün XRD analizi

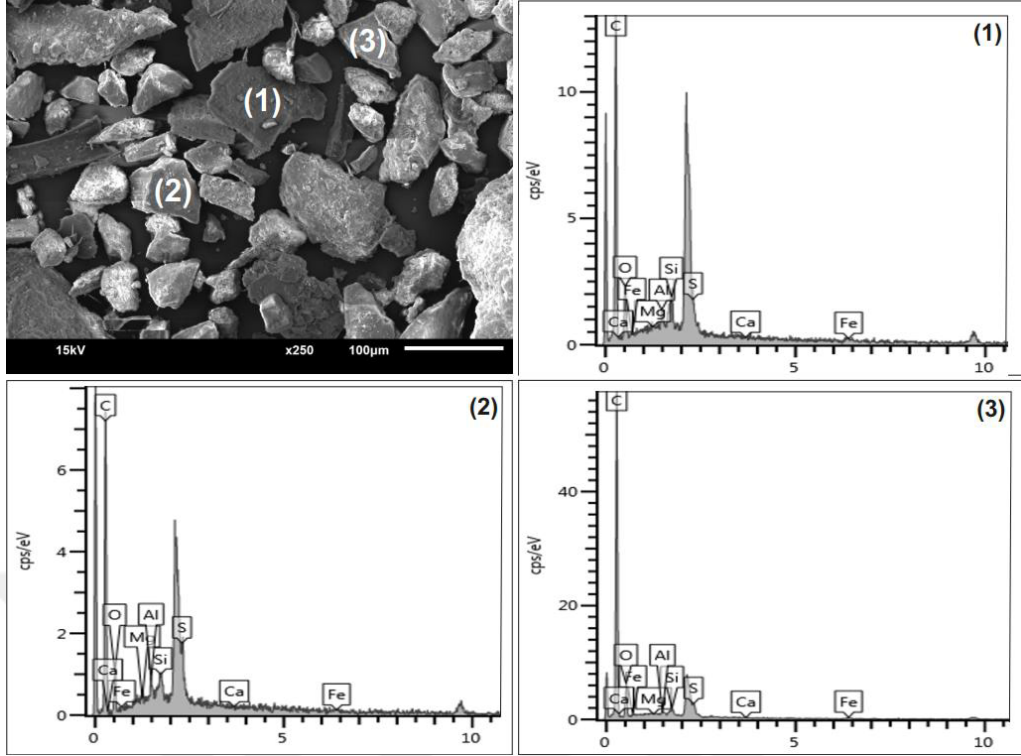


Şekil 3.32.  $\text{AlCl}_3$  tuzu kullanıldığında elde edilen atığın XRD analizi

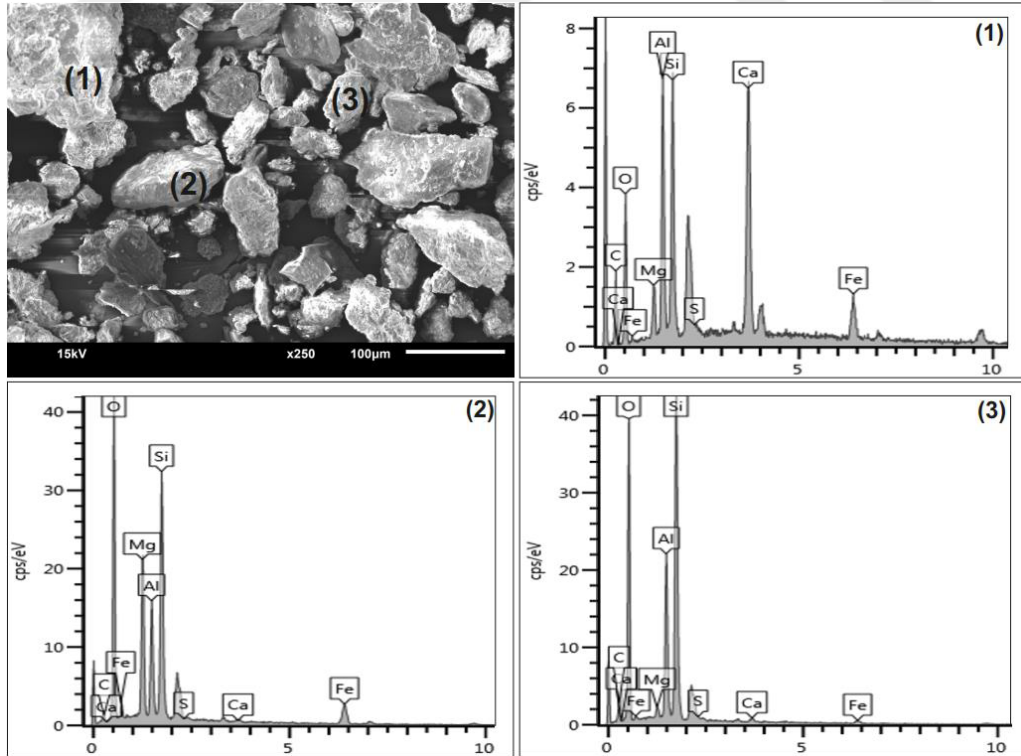


Şekil 3.33.  $AlCl_3$  tuzu kullanıldığında elde edilen (a) temiz kömür ve (b) atığın parlak kesit görüntüleri





Şekil 3.34.  $\text{AlCl}_3$  tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömürün SEM-EDS analizi



Şekil 3.35.  $\text{AlCl}_3$  tuzu kullanıldığında elde edilen atığın SEM-EDS analizi

Tablo 3.2. AlCl<sub>3</sub> tuzu kullanıldığında elde edilen temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi

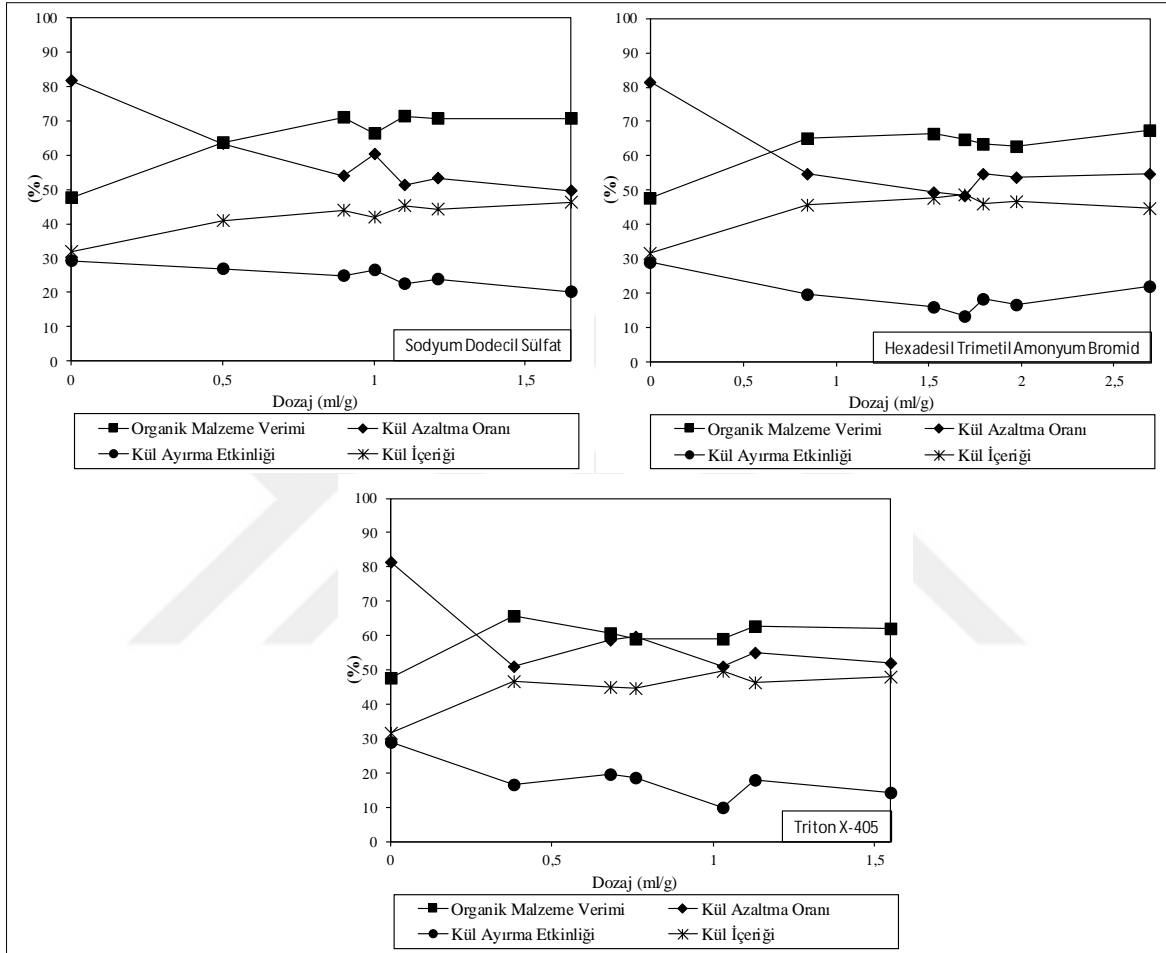
Element (%)	Temiz Kömür			Atık		
	1	2	3	1	2	3
C	74,5	72,6	77,9	18,5	6,4	13,4
O	17,0	20,7	19,0	28,7	50,4	54,8
Al	0,9	1,0	0,2	9,0	7,1	9,1
Si	1,3	1,8	0,4	8,9	15,4	19,7
S	5,1	2,6	1,7	0,5	0,0	0,3
Fe	0,8	1,1	0,7	12,0	9,8	1,6
Mg	0,3	0,1	0,0	2,0	10,4	0,6
Ca	0,1	0,0	0,1	20,4	0,3	0,5

### 3.2.10. Sürfaktantların Aglomerasyona Etkisi

Aglomerasyon testlerinde sürfaktantlar kullanılarak yağın daha küçük boyutlara indirilmesi ve bu sayede işlem performansının artırılması planlanmıştır. Sürfaktantların etkisini incelemek için Sodyum Dodecil Sülfat (anyonik), Hexadesil Trimetil Amonyum Bromid (katyonik) ve Triton X-405 (noniyonik) sürfaktantlar kullanılmıştır. Bu sürfaktantların CMC (Kritik Misel Konsantrasyonu) konsantrasyonları farklı olduğundan her sürfaktant için farklı dozaj aralığı değişken olarak incelenmiştir.

Sürfaktantların kullanılmadığı durumlarda %47,6 olan organik malzeme verimi Sodyum Dodecil Sülfat (SDS), Triton X-405 ve Hexadesil Trimetil Amonyum Bromid (HTAB) kullanılmasıyla sırasıyla maksimum olarak %71,2, %65,6 ve %67,4 değerlerine çıkmıştır (Şekil 3.36). Bunun nedeni sürfaktantların kullanılmasıyla ortamdaki yağ damlacıklarının boyutu küçülmüş ve yağ damlacığı miktarının artmasıdır. Bu sayede kömür taneleriyle yağ damlacıklarının çarpışma ihtimali de artmıştır. Aynı zamanda normalden çok daha küçük boyutlarda elde edilen yağ damlacıklarının kömür yüzeyini çok daha iyi kaplamasıyla aglomerasyon işleminin verimi artmıştır. Kömür kazanımı üzerine yapılan çalışmalarda yağın ortama direk verilmesinden sürfaktantlar yardımıyla emülsüfiye edilerek verilmesinin işlem performansını arttırdığı birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Bensley vd., 1977; Cebeci ve Eroğlu, 1998; Laskowski ve Yu, 2000; Cebeci

ve Sönmez, 2002; Cui vd., 2017; Chen vd., 2018; Xia vd., 2019). Sürfaktantların kullanıldığı ilk ve en düşük dozajda organik malzeme veriminde keskin bir artış olmasına rağmen sürfaktant miktarının daha da arttırılmasının organik malzeme verimi üzerinde ilave pozitif etkisi olmamıştır.



Şekil 3.36. Farklı sürfaktantların aglomerasyon performansına etkisi

Laskowski ve Yu (2000) oldukça yüksek negatif yüzey yüküne sahip düşük kaliteli ve oksitli kömürlerin katyonik sürfaktantlar ile emülsiyeye edilmiş yağların kullanılmasıyla yağ aglomerasyonu işleminin daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir. Lin ve Liu (1996) iyonik yapılu sürfaktantların kömür yüzey potansiyelini düşürerek daha dayanıklı aglomeratların oluşmasını sağladığını belirtmişlerdir. Kılınç (2000) anyonik, katyonik ve noniyonik sürfaktantların aglomerasyona etkisini incelediği çalışmasında benzer şekilde sürfaktant miktarının artmasının verimi arttırdığını tespit etmiştir.

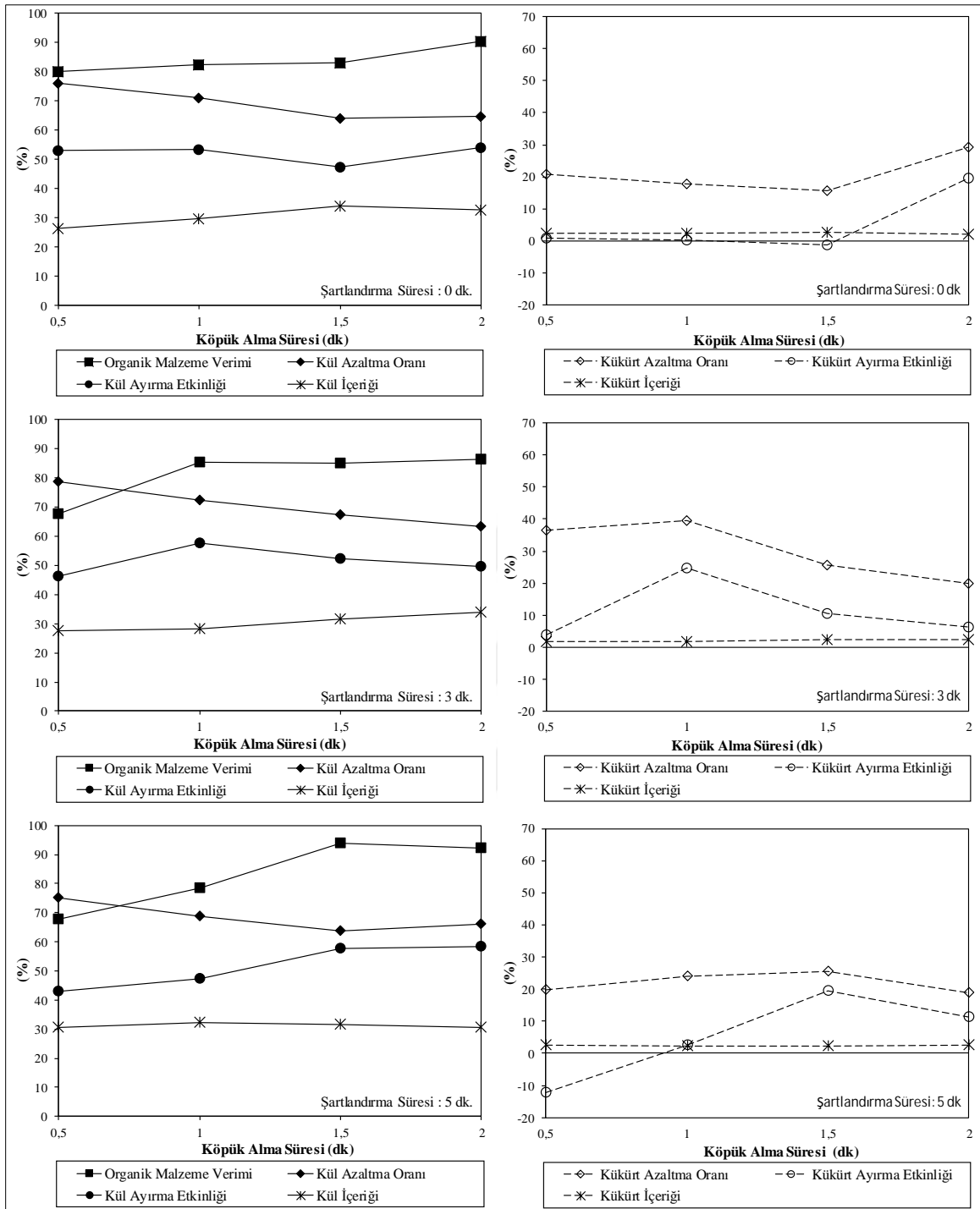
Sülfaktantların kullanılmadığı durumlarda %81,5 olan kül azaltma oranı SDS, Triton X-405 ve HTAB kullanılmasıyla sırasıyla %63,2, %59,7 ve %54,8'e, sülfaktantların kullanılmadığı durumda %29 olan kül ayırma etkinliği ise SDS, Triton X-405 ve HTAB'nin kullanılmasıyla sırasıyla %26,9, %19,5 ve %22,2'e düşmüştür. Chen vd. (2018) ve Xia vd. (2019) düşük kaliteli kömürlerin temizlenmesi sırasında katyonik sülfaktantların etkisini araştırdıkları çalışmalarında sülfaktant miktarı arttıkça konsantrenin kül içeriğinin arttığını tespit etmişlerdir. Kılınç (2000) ise anyonik, katyonik ve noniyonik sülfaktantların kullanılmasıyla konsantrenin kül içeriğinin arttığını belirlemiştir. Cebeci ve Eroğlu (1998) fuel-oil ile sülfaktantların kullanılmasıyla elde edilen konsantrelerin kül içeriğinin arttığını gözlemlemiştir. Yağın ortama daha iyi ve daha küçük damlacıklar halinde dağılmasına ve yağ damlacıklarının toplam yüzey alanının artışına bağlı olarak inorganik safsızlıkların da yağlarla teması artmış ve aglomeratların arasına girmişlerdir (Cebeci ve Eroğlu, 1998; Kılınç, 2000).

### **3.2.11. Flotasyon ile Aglomerat Kazanımı**

Aglomerasyon deneylerinde aglomeratları kazanmak için elek kullanımı sırasında yeterince büyüemeyen aglomeratların eleklerden geçerek kaybedildiği ve organik malzeme veriminin yeteri kadar yüksek olmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple diğer bir aglomerat kazanım yöntemi olarak flotasyon kullanılmıştır. Aglomerasyon işleminden sonra pülp flotasyon hücrelerine aktararak aglomeratların kazanılması sağlanmıştır. Aglomerat kazanım aşamasında şartlandırma süresi, köpük alma süresi, karıştırma hızı, köpürtücü (MIBC) dozajı ve tane boyutu gibi parametrelerinin işlem performansı üzerine etkisi incelenmiştir.

0 dk, 3 dk ve 5 dk'da şartlandırma süreleri için yapılan flotasyon işleminde köpük alma süresinin işlem performansı üzerine etkisi incelenmiştir (Şekil 3.37). Bütün şartlandırma sürelerinde köpük alma süresi arttıkça organik malzeme verimi artmıştır. Aglomerat kazanım yöntemi olarak elek kullanıldığı durumda %47,6 olan organik malzeme verimi, şartlandırılma yapmadan (0 dk) yapılan deneylerde köpük alma süresi 0,5 dk'dan 2 dk'ya çıkmasıyla organik malzeme verimi %79,9'dan %90,3'e ulaşmış, şartlandırma süresi 3 dk olduğu durumda köpük alma süresinin 0,5 dk'dan 2 dk'ya çıkmasıyla organik malzeme verimi %67,6'den %86,3'e ulaşmış ve şartlandırma süresi 5 dk olduğu durumda köpük alma süresinin 0,5 dk'dan 2 dk'ya çıkmasıyla organik malzeme verimi %67,8'den %92,2'e ulaşmıştır.





Şekil 3.37. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında köpük alma süresinin aglomerasyon performansına etkisi

Aglomerat kazanımı için elek yerine flotasyon yönteminin kullanılmasıyla organik malzeme verimi yaklaşık iki katına çıkmıştır. Aglomeratların bir kısmının flotasyon hücresine aktarılırken parçalandıkları görülmüş fakat şartlandırma süresinin artmasıyla

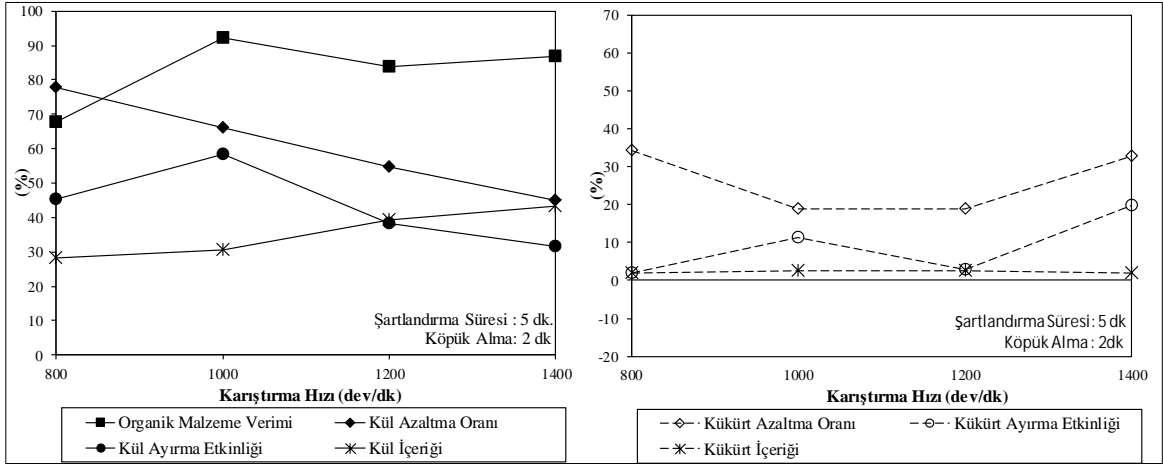
aglomeratların tekrar oluştuğu gözlenmiştir. Şartlandırma süresinin artışı aktarma esnasında oluşan aglomerat ve gang karışımının tekrar ayrışmasını artırmıştır.

Köpük alma süresi arttıkça kül azaltma oranları düşmüştür. Başlarda daha temiz aglomeratlar kazanılırken sürenin artışıyla aglomeratlarla beraber safsızlıklar da konsantreye alınmıştır. Şartlandırma süresinin 0 dk, 3 dk ve 5 dk olduğu durumlarda köpük alma süresi 0,5 dk'dan 2 dk'ya çıktığında kül azaltma oranı sırasıyla %76,1'den %64,9'a, %78,6'dan %63,2'e ve %75,2'den %66,2'e düşmüştür. Aglomeratların elek ile kazanıldığı durumda en iyi koşullarda %29,1 olan kül ayırma etkinliği, 5dk'lık şartlanma süresi ve 2 dk'lık aglomerat kazanım süresinin sonunda %58,5'e yükselmiştir. Çuhadaroğlu (1994) köpük alma süresi arttıkça temiz kömürün kül içeriğinin arttığını belirtmiştir.

0 dk, 3 dk ve 5 dk'lık şartlandırma süreleri için yapılan flotasyon işleminde köpük alma süresinin kükürt azaltma oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Kükürt azaltma oranı şartlandırma süresinin 0 dk olduğu durumda %15,7-29,1 arasında, şartlandırma süresinin 3 dk olduğu durumda %19,9-39,5 arasında ve şartlandırma süresinin 5dk olduğu durumda %18,9-25,6 arasında değişmiştir. Kükürt içeriğindeki negatif değişikliğin sebebi, aglomerasyon hücresinden flotasyon hücresine aktarılan aglomeratların bu transfer sırasında parçalanma ve tekrar birleşmesi anında aglomeratların arasına giren pirit miktarının artmasıdır. Genel olarak flotasyon süresinin artmasıyla kükürt azaltma oranı düşmüştür. Bunun sebebi flotasyon süresinin artmasıyla daha fazla piritin aglomeratlar ile birlikte konsantreye gelmesidir.

Kül ayırma etkinliği açısından en iyi sonuçlar 5 dk şartlandırma süresi ve 2 dk köpük alma süresi olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda karıştırma hızının etkisi incelenmiştir. Şekil 3.38'den görüldüğü gibi karıştırma hızının 800 dev/dk'dan 1000 dev/dk'ya çıkmasıyla organik malzeme verimi %67,6'dan %92,2'e yükselmiştir. Bunun sebebi flotasyon selülüne aktarılırken parçalanan aglomeratların karıştırma hızının artmasıyla tekrar oluşmasıdır. Karıştırma hızının 1400 dev/dk'ya çıkması aglomeratların tekrar dağılmasına sebep olmuş ve organik malzeme verimi de %83,8'e düşmüştür. Karıştırma hızı arttıkça kül azaltma oranı azalarak %77,8'den %44,8'e düşmüştür. Bunun sebebi artan hızla birlikte aglomeratların arasına giren mineral madde miktarının artışıdır.

Karıştırma hızının artmasıyla beraber kükürt azaltma oranı düşmüştür. Karıştırma hızının 800 dev/dk'dan 1400 dev/dk'ya çıkmasıyla kükürt azaltma oranı %59,3'den %10,6'a düşmüştür. Bunun sebebi, aglomeratların arasındaki boşluklara giren pirit miktarının artışıdır.

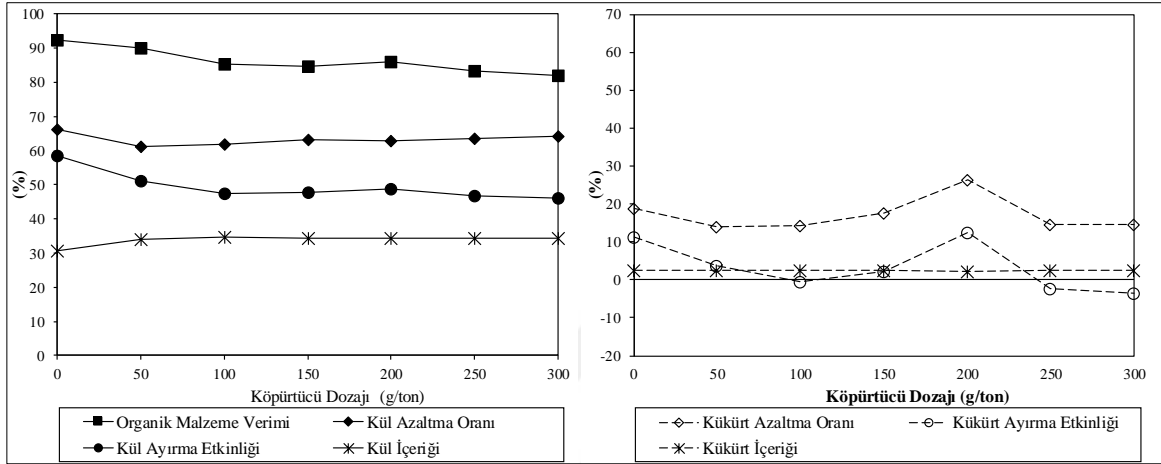


Şekil 3.38. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında karıştırma hızının aglomerasyon performansına etkisi

Köpürtücü kullanımıyla beraber organik malzeme verimi azalmıştır. Köpürtücü kullanılmadığı durumda %92,2 olan organik malzeme verimi köpürtücü miktarının 50 gr/ton'dan 300 gr/ton'a çıkmasıyla %89,9'dan %82,0'e düşmüştür. Aglomerasyon deneylerinde -500  $\mu$ m boyutu kullanıldığında, oluşan aglomeratların neredeyse yarısına yakın miktarının 850  $\mu$ m boyutunun üzerinde bir boyuta büyüdüğü tespit edilmiştir. Köpürtücü kullanıldığında boyutu küçülen hava kabarcıkları ile boyutu bu kadar büyüyen aglomeratlar yukarı taşınamayarak kaybedilmiş ve organik malzeme verimi düşmüştür. Flotasyon işleminin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için taneciğin hava kabarcığıyla teması ve kararlı tanecik kabarcık birlikteliğinin oluşması tek başına yeterli olmayıp tanenin kabarcıkla birlikte kolay bir şekilde yükselmesi de gerekmektedir. Küçük hava kabarcıklarının büyük tanelere yapışma olasılığı daha iyi olmasına rağmen taneleri başarılı bir şekilde yükseltebilmek için kaldırma güçleri yetersiz kalmaktadır. Tao (2004), iri ve ince tanelerin flotasyonunda hava kabarcık boyutunun etkisini incelemişler ve küçük kabarcıkların iri boyutlu malzemeleri yukarı taşımada yetersiz kaldıklarını ortaya koymuşlardır. Ayrıca bu problemin aşılması için küçük kabarcıkların bulunduğu ortama bir miktar iri kabarcığın da ilave edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Köpürtücü kullanılmadığı durumda %66,2 kül azaltma oranı ile kömür kazanılmıştır. Köpürtücü miktarının 50 gr/ton'dan 300 gr/ton'a çıkmasıyla kül azaltma oranı %61,2'den %64,1'e çıkmıştır (Şekil 3.39). Diğer bir ifadeyle köpürtücü kullanılmasının kül azaltma üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir.

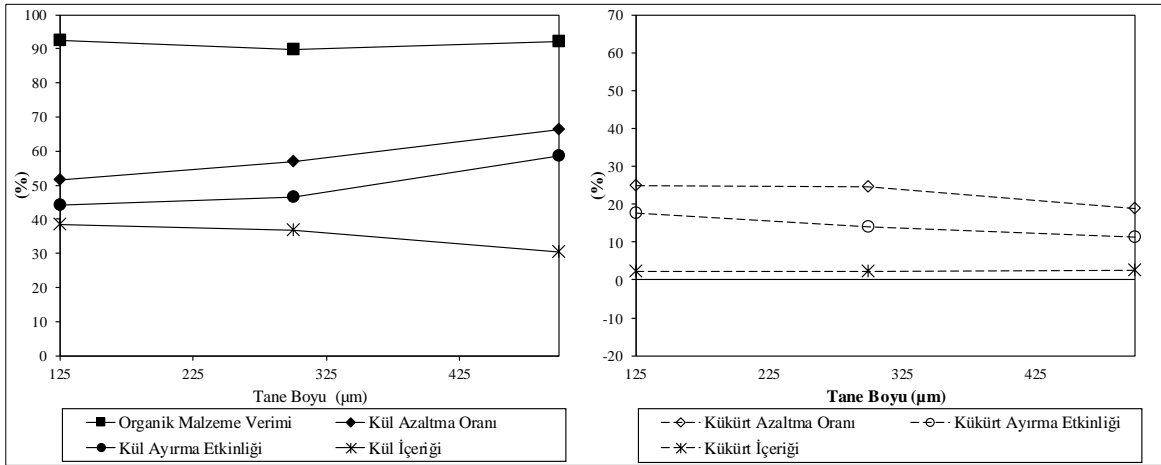
Köpürtücü kullanılmadığı durumda %18,9 olan kükürt azaltma oranı köpürtücü miktarının 200 gr/ton'a ulaşmasıyla %26,5 değerine ulaşmış ve köpürtücü miktarının daha da artmasıyla düşmüştür. Kawatra ve Eisele (2001) de benzer şekilde bütün köpürtücülerin bir değerden sonra seçimliliği düşürdüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 3.39. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında köpürtücü dozajının aglomerasyon performansına etkisi

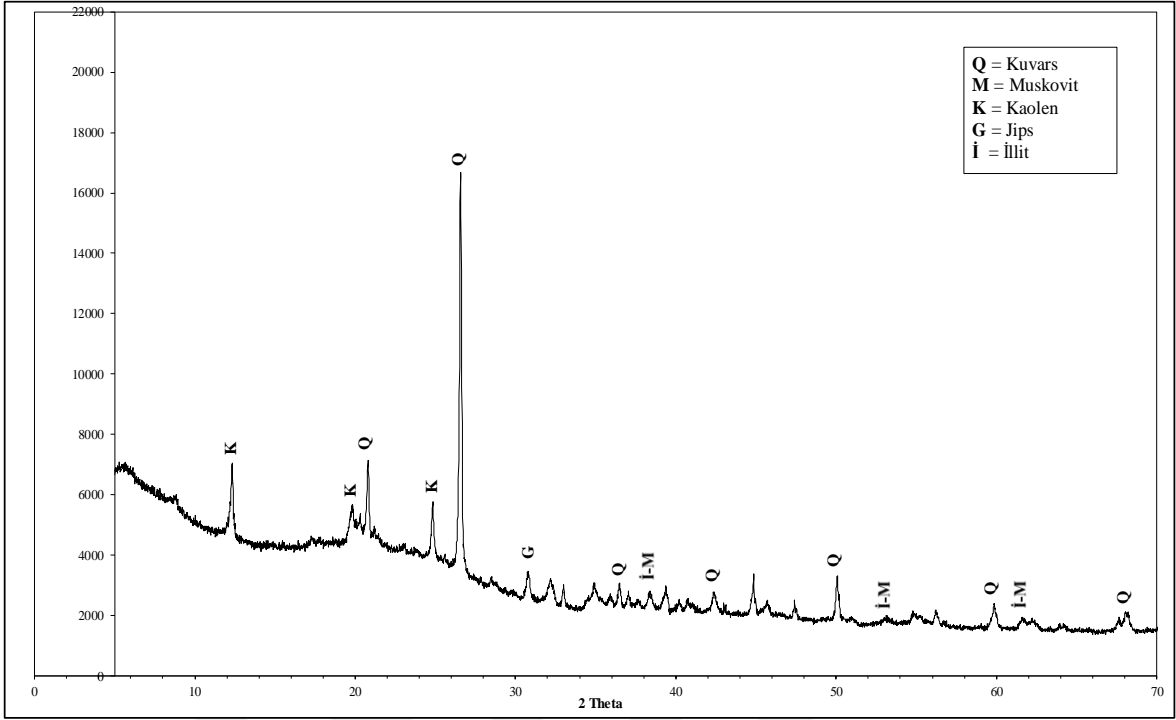
Flotasyon ile aglomerat kazanımında tane boyutunun azalmasıyla organik malzeme veriminde önemli bir değişiklik olmamıştır. Fakat tane boyutunun azalmasıyla beraber kül azaltma oranı ve kül ayırma etkinlikleri düşmüştür. Aglomerat kazanım yöntemi olarak her tane boyutunda kendi maksimum parçacık boyutundaki elekler kullanıldığında da oluşan aglomeratların kül içeriği artarken kül azaltma oranları düşmüştür. Kawatra ve Eisele, (2001) tane boyutu küçüldükçe kömür ve yağ tanecikleri arasındaki boşluklara giren mineral madde miktarının arttığını, tane boyutu çok küçüldüğünde ise hidrofobik kömür tanelerinin seçimli olarak hava kabarcıklarına yapıştığını, mineral maddelerin ve özellikle de killerin seçimsiz olarak köpüklerin aralarına taşındığını ve boyutları küçük olan ince tanelerin çökemeyerek köpükler arasına giren su miktarıyla orantılı bir şekilde artarak yukarı doğru kolayca taşındığını ifade etmiştir.

Kükürt azaltma oranında ise tane boyutunun küçülmesiyle bir miktar artış görülmüştür. Tane boyutunun 500  $\mu\text{m}$ 'den 125  $\mu\text{m}$ 'ye azalmasıyla kükürt azaltma oranı %18,9'dan %24,9'a yükselmiştir (Şekil 3.40).

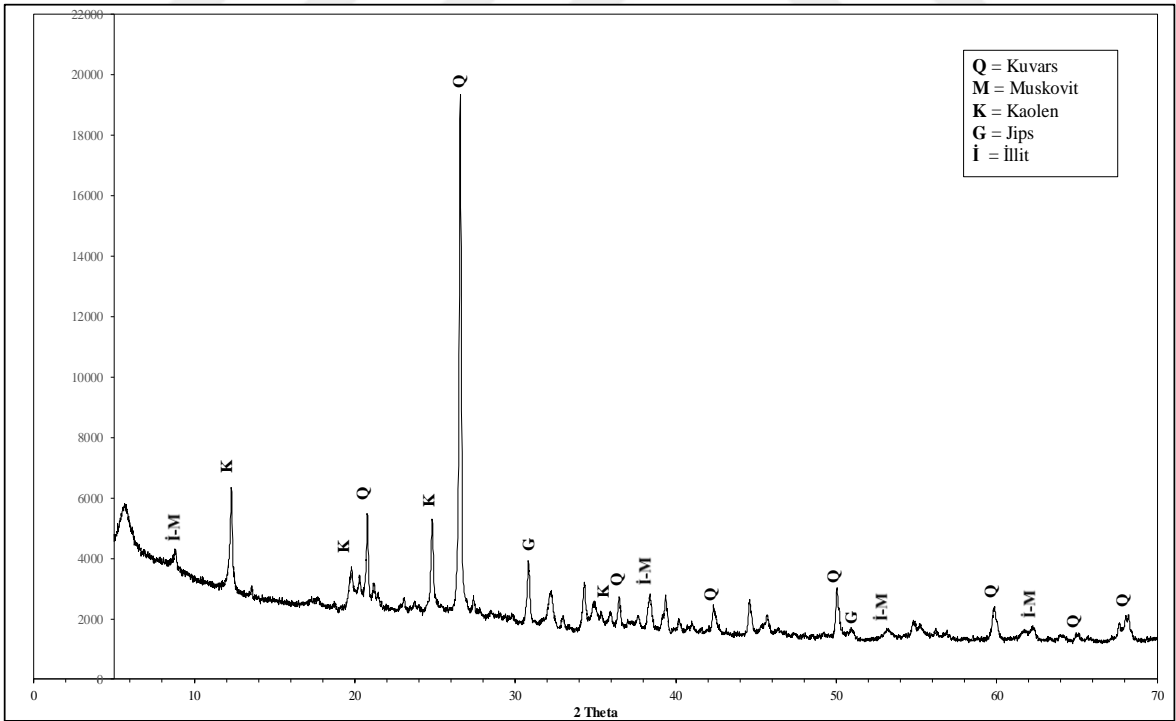


Şekil 3.40. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında tane boyutunun aglomerasyon performansına etkisi

Aglomerat kazanım yöntemi olarak elek yerine flotasyon kullanıldığı durumda ve kül ayırma etkinliğinin en yüksek olduğu koşullarda, %66,2 kül azaltma oranıyla %30,5 kül içerikli temiz kömür %92,2 organik malzeme verimi ile elde edilmiştir. Kükürt azaltma oranı %18,9 olup temiz kömürün kükürt içeriği %2,44 ve kalorifik değeri 5198,9 kcal/kg'dır. Temiz kömür ve atık üzerinde yapılan SEM-EDS, XRD, parlak kesit analizlerinden (Şekil 3.41-45 ve Tablo 3.3) kömürden kül ve mineral madde uzaklaştırmada yöntemin oldukça başarılı olduğu anlaşılabılır.

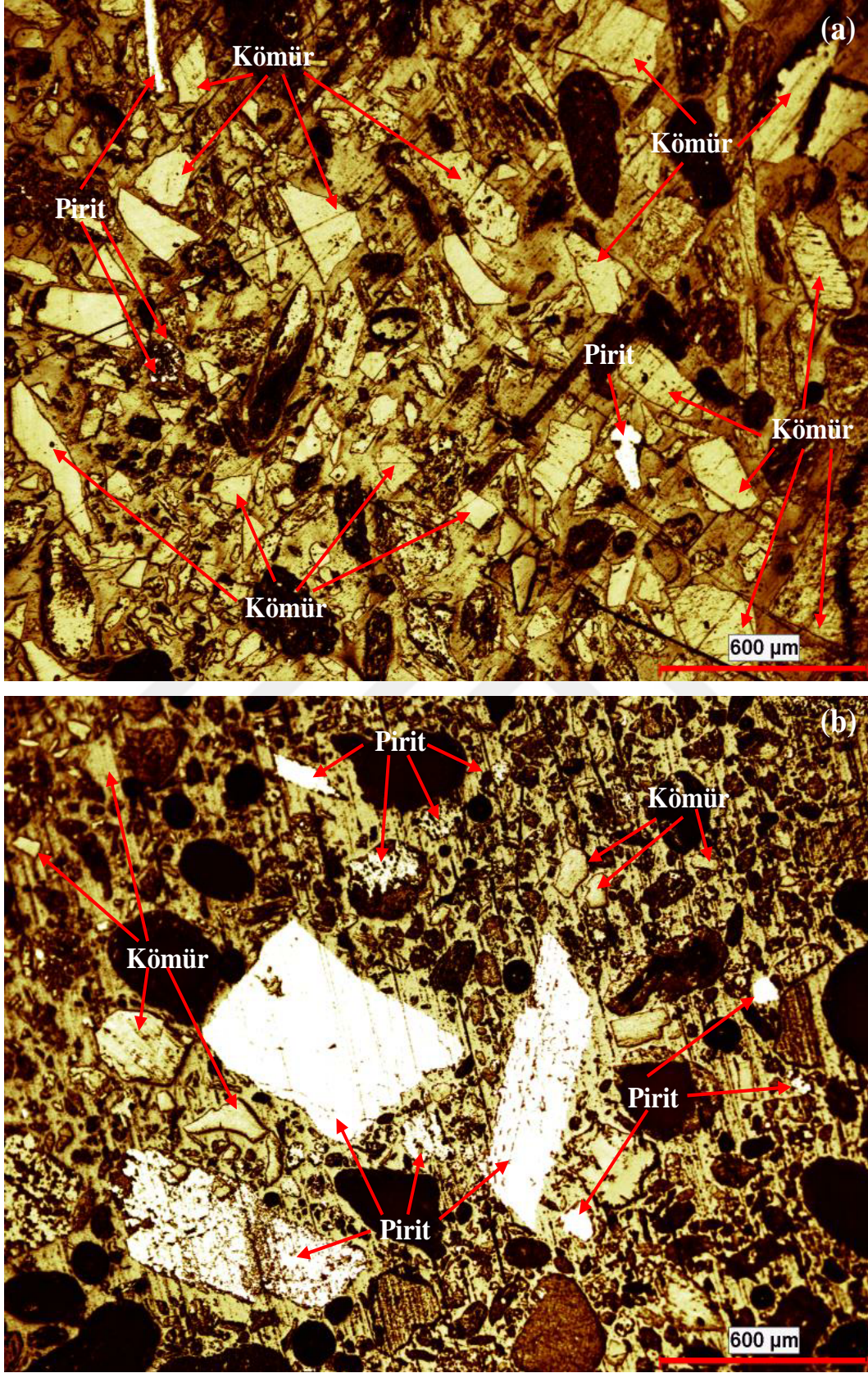


Şekil 3.41. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömürün XRD analizi



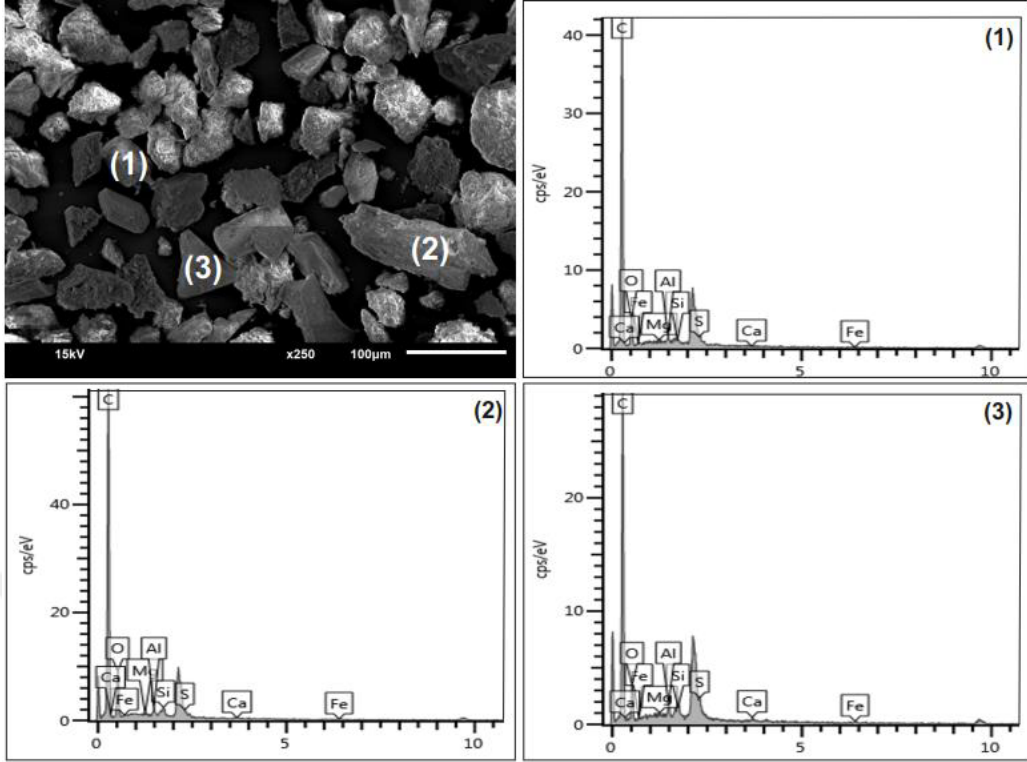
Şekil 3.42. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen atığın XRD analizi



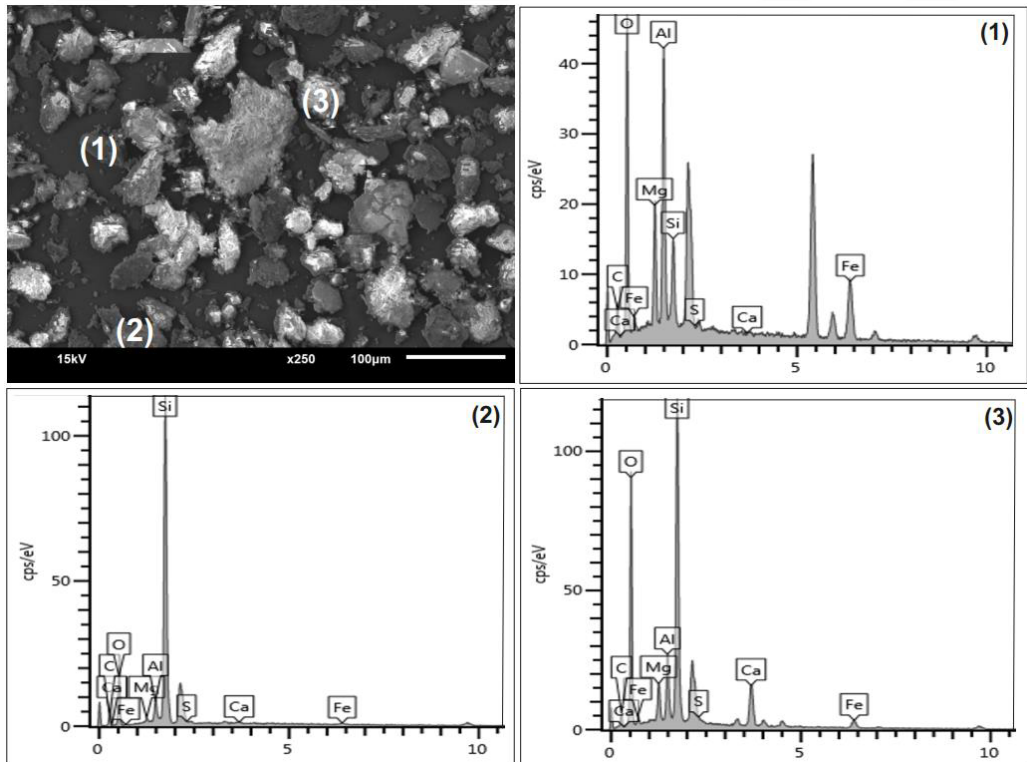


Şekil 3.43. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen (a) temiz kömür ve (b) atığın parlak kesit görüntüleri





Şekil 3.44. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömürün SEM-EDS analizi



Şekil 3. 45. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen atığın SEM-EDS analizi



Tablo 3.3. Aglomerat kazanımında flotasyon kullanıldığında elde edilen temiz kömür ve atığın SEM-EDS analizindeki noktaların elementel analizi

Element (%)	Temiz Kömür			Atık		
	1	2	3	1	2	3
C	80,4	76,7	73,8	13,3	22,6	9,4
O	17,7	18,8	23,8	39,8	31,5	53,2
Al	0,4	0,9	0,5	13,6	2,4	4,0
Si	0,2	0,6	0,5	4,4	41,1	20,0
S	1,0	1,9	0,7	0,0	0,3	0,5
Fe	0,1	0,5	0,5	22,5	1,2	4,2
Mg	0,1	0,1	0,1	6,3	0,4	2,4
Ca	0,0	0,4	0,2	0,1	0,4	6,3

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'deki linyit lavvarlarından biri olan Tunçbilek lavvarı ince boyutlu atıklarından yağ aglomerasyonu yöntemiyle kömürün kazanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şunlardır:

1. Atıklar şlam uzaklaştırma yapılmadan direk olarak yağ aglomerasyonu işlemine tabii tutulursa yüksek oranlarda kül uzaklaştırılmasına rağmen organik malzeme verimleri çok düşük kalmaktadır. Optimum koşullarda %71,1 kül içerikli şlamlı atıklardan %41 küllü içerikli temiz kömür %18,3 organik malzeme verimiyle elde edilmiştir. Şlam dağıtma amacıyla çeşitli dağıtıcı reaktifler (Sodyum Silikat, Sodyum Hexametaphosphat, Sodyum Triphosphate) kullanılsa da organik malzeme verimi en yüksek %26'a ulaşmıştır. Literatürde sıkça bahsedilen ve yağ aglomerasyon yönteminin avantajlarından biri olarak gösterilen şlam içeren kömürlerde başarıyla uygulanabilirlik doğrulanamamıştır.
2. Yağ aglomerasyonu yöntemi şlamı uzaklaştırılmış atıklar üzerinde uygulandığında optimum koşullarda %54,6 kül içerikli, %3,0 kükürt içerikli ve 2720,7 kcal/kg ısı değerli şlamsız atıklardan %31,8 kül içerikli, %1,6 kükürt içerikli ve 4758,8 kcal/kg ısı değerli temiz kömür %47,6 organik malzeme verimi ile kazanılmıştır. Bu sonucun elde edildiği deney koşulları şu şekildedir; katı oranı: %10, yağ dozajı: %15, karıştırma hızı: 1400 dev/dk, karıştırma süresi: 10dk, ortam pH'ı: 6,34, yıkama suyu miktarı: 1,5 l, elek boyutu: 500 µm, yağ cinsi: atık yağ. Aşağıda sonuçları açıklanan ve performansı arttırmak amacıyla çeşitli tuzların, sürfaktantların ve aglomerat kazanım yöntemi olarak flotasyonun kullanıldığı testlerde de aynı deney koşulları çalışılmıştır.
3. Çeşitli tuzlar ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{AlCl}_3$  ve  $\text{FeCl}_3$ ) kullanılarak aglomerasyon performansı, özellikle %50'lerin altında kalmış organik malzeme verimi açısından, artırılmaya çalışılmıştır. En başarılı sonuç  $\text{AlCl}_3$  tuzunun kullanıldığında elde edilmiş olup, %54,6 kül içerikli, %3,0 kükürt içerikli ve 2720,7 kcal/kg ısı değerli şlamsız atıklardan %31,2 kül içerikli, %1,3 kükürt içerikli ve 3672 kcal/kg ısı değerli temiz kömür %63,9 organik malzeme verimi ile kazanılmıştır.

4. Yağların daha iyi emilsüfiye edilip verimin artması amacıyla çeşitli sürfaktantlar (Sodyum dodecil sülfat, Hexadesil Trimetil Amonyum Bromid, Triton X-405) kullanılmıştır. Organik malzeme verimindeki artışa rağmen kül azaltma oranlarının oldukça yüksek oranlarda düşmesi kül ayırma etkinliğini düşürmüştür. Optimum koşullarda %54,6 kül içerikli atıklardan %63,2 kül azaltma oranı ile %40,8 küllü içerikli temiz kömür %63,6 organik malzeme verimiyle Sodyum dodecil sülfat kullanılarak elde edilmiştir.
5. Aglomerasyon deneyleri aglomerat kazanım yöntemi olarak elek yerine flotasyon işlemi kullanılarak tekrarlanmış ve çeşitli flotasyon parametrelerinin performans üzerine etkisi incelenmiştir. Optimum koşullarda, %54,6 kül içerikli, %3,0 kükürt içerikli ve 2720,7 kcal/kg ısı değerli şlamsız atıklardan %30,5 kül içerikli, %2,4 kükürt içerikli ve 5198,9 kcal/kg ısı değerli temiz kömür %92,2 organik malzeme verimi ile kazanılmıştır. Kükürt içeriği %1,2, kül içeriği %28,3 olan temiz kömür elde edilse de organik malzeme verimi %76,8'de kalmıştır. Aglomerat kazanmak için elek yerine flotasyonun kullanılması organik malzeme verimini neredeyse iki katına çıkarmıştır.

### **Öneriler:**

1. Türkiye'deki diğer lavvar atıklarından da aynı yöntemle kömürün kazanılabilirliği araştırılmalıdır.
2. Lavvar atıklarından yağ aglomerasyonu ile kömür kazanımında farklı atık yağların bağlayıcı yağ olarak kullanılabilirliği araştırılmalıdır.
3. Aglomerasyon işlemi sonucunda elde edilen temiz kömürler üzerlerindeki yağ uzaklaştırılmadan karakterize edilerek, yağın kömürün kül içeriği, kalorifik değer ve yanabilirlik özelliklerine etkisi araştırılmalıdır.
4. Kullanılan yağın ne kadarının aglomerasyon işlemi atığına geçtiği belirlenerek bu yağın tekrar kazanılabilirliği ve kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

## 5. KAYNAKLAR

- Aaron, N. ve Gerald, L.H.A., 2015. Review of State-of-the-art Processing Operation in Coal Preparation, International Journal of Mining Science and Technology, 25, 511-521.
- Abakay Temel, H., Bozkurt, V. ve Majumder, A.K., 2009. Selective Oil Agglomeration of Lignite, Energy & Fuels, 23, 779-784.
- Abakay Temel, H., 2007. Adıyaman-Gölbaşı Linyitinin Değerlendirme Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Abakay Temel, H. ve Ayhan, F.D., 2006. Desulfurization and Deasing of Hazro Coal by Selective Oil Agglomeration in Various Water Mediums, Energy & Fuels, 20, 2052-2055.
- Acarcan, N. ve Önal, G., 2014. Özgül Ağırlık Farkı (Gravite) ile Zenginleştirme, Cevher Hazırlama El Kitabı, Önal, G., Ateşok, G. ve Perek, K.T., Eds., 127-159.
- Afacan. T., 2008. Bitkisel Atık Yağlar Konusunda Sorumluluklarımız ve Biyodizelin Önemi. Atık Bitkisel Yağların Çevreye ve İnsan Sağlığına Etkileri ve Biyodizelin Önemi Sempozyumu, 10 Ocak 2008, İstanbul.
- Akhtar, J., Rehman, S., Sheikh, N. ve Munir, S., 2016. Agglomeration of Pakistani Coal (Lakhra) using Diesel Oil, Energy Sources, Part A, 38, 3144-3149.
- Aktaş, Z., 2002. Some Factors Affecting Spherical Oil Agglomeration Performance of Coal Fines, International Journal of Mineral Processing, 65, 177-190.
- Alonso, M., Valdes, A., Martinez-Tarazona, R. ve Garcia, A., 2002. Coal Recovery from Fines Cleaning Wastes by Agglomeration with Colza Oil: A Contribution to the Environment and Energy Preservation, Fuel Processing Technology, 75, 85-95.
- Alonso, M.I., Castano, C. ve Garcia, A.B., 2000. Performance of Vegetable Oils as Flotation Collectors for the Recovery of Coal from Coal Fines Wastes, Coal Preparation, 21, 411-420.
- Alonso, M.I., Valdes, A.F., Martinez-Tarazona, R.M. ve Garcia, A.B., 1999. Coal Recovery from Coal Fines Cleaning Wastes by Agglomeration with Vegetable oils: Effects of Oil Type and Concentration, Fuel, 78, 753-759.
- Altun, N.A. ve Hiçyılmaz, C., 2001. Evaluation of Çorum Alpogut Waste Lignite Fines, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 35, 171-180.
- Aplan, F.F. ve Arnold, B.J., 1991. Wet Fine Particle Concentration Section 3: Flotation, Coal Preparation, 5<sup>th</sup> Edition, J.W. Leonard ve B.C. Hardinge, Eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, INC., Littleton, Colorado, 450-485.

- Arnold, B. ve Aplan, F., 1989. The Hydrophobicity of Coal Macerals, Fuel, 68, 651-658.
- Asghari, M., Noaparast, M., Shafaie, S.Z., Ghassa, S. ve Chehreh Chelgani, S., 2018. Recovery of Coal Particles from a Tailing Dam for Environmental Protection and Economical Beneficiations, International Journal of Coal Science & Technology, 5, 253-263.
- Aslan, N. ve Ünal, İ., 2011. Multi-Response Optimization of Oil Agglomeration With Multiple Performance Characteristics, Fuel Processing Technology, 92, 1157–1163.
- ASTM-D 3172-89, Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke.
- ASTM-D 3173-03, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke.
- ASTM-D 3174-89, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal.
- ASTM-D 3175-89, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke.
- ASTM-D 4239, Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-temperature Tube Furnace Combustion.
- Atak, S., 2017. Flotasyon, Genişletilmiş 2. Baskı, 232, İTÜ Vakfı Yayınları, İstanbul.
- Ateşok, G., 2004. Kömür Hazırlama ve Teknolojisi, 1. Baskı, Berail Yayıncılık Matbacılık Ltd. Şti., İstanbul.
- Barraza, J., Guerrero, J. ve Pineres, J., 2013. Flotation of a Refuse Tailing Fine Coal Slurry, Fuel Processing Technology, 106, 498-500.
- Baruah, M.K., Kotoky, P., Baruah, J. ve Bora, G.C., 2000. Cleaning of Indian Coals by agglomeration with Xylene and Hexane, Separation and Purification Technology, 20, 235-241.
- Bhattacharyya, R., Moza, A. ve Sarkar, G., 1977. Role of Operating Variables in Oil-Agglomeration of Coal, Agglomeration 77, K.V.S. Sastry, Ed., New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 931–938.
- Bensley, C.N., Swanson, A.R. ve Nicol, S.K., 1977. The Effect of Emulsification on the Selective Agglomeration of Fine Coal, International Journal of Mineral Processing, 4, 173-184.
- Bos, A. ve Zuiderweg, F., 1985. Kinetics of Continuous Agglomeration in Suspension, Powder Technology, 44, 43-51.

- Brum, I.A.S., Vila, G.B.G. ve Jesus, L.G.M., 2012. Studies in Column Flotation to Recovery Carbon Matter from Coal Tailings, 26th International Mineral Processing Congress, IMPC 2012: Innovative Processing for Sustainable Growth, 684-690.
- Can, M.F., Özgen, S. ve Sabah, E., 2010. A Study to Recovery Coal from Turkish Lignite Fine Coal Tailings: Comparison of Falcon Concentrator and Multi Gravite Separator (MGS), 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference, R. Beck, Ed., Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 1897-1912.
- Capes, C., 1991. Oil Agglomeration Process Principles and Commercial Application for Fine Coal Cleaning, Coal Preparation, 4, 1021-1029.
- Capes, C.E., Coleman, R.D. ve Thayer, W.L., 1985. Oil Agglomeration for Fine Coal Processing, 4th International Symposium on Agglomeration, Iron and Steel Society, June 2-5, Toronto, Canada, Bildiriler Kitabı: 857-866.
- Capes, C.E. ve Dorcovich, K., 1984. A Survey of Oil Agglomeration in Wet Fine Coal Processing, Powder Technology, 40, 43-52.
- Capes, C.E. ve Germain, R.J., 1982. Selective Oil Agglomeration in fine Coal Beneficiation. Physical Cleaning of Coal: Present and Developing Methods, Y.A. Liu, Ed., 312–318.
- Capes, C., 1976. Basic Research in Particle Technology and Some Novel Application, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 54, 3-12.
- Carbini, P., Ciccu, R., Ghiani, M. ve Satta, F., 1992. Agglomeration of Coals of Different Rank Using Mixtures of Oils, Coal Preparation, 11, 11-19.
- Cebeci, Y. ve Eroglu, N., 1998. Determination of Bridging Liquid Type in Oil Agglomeration of Lignites, Fuel, 77, 419–424.
- Cebeci, Y. ve Sönmez, İ., 2006. Application of the Box-Wilson Experimental Design Method for the Spherical Oil Agglomeration of Coal, Fuel, 85, 289-297.
- Cebeci, Y., 2003. Investigation of Kinetics of Agglomerate Growth in Oil Agglomeration Process, Fuel, 82, 1645-1651.
- Cebeci, Y. ve Sönmez, İ., 2002. The Investigation of Coal-Pyrite/Lignite Concentration and Their Separation in the Artificial Mixture by Oil Agglomeration, Fuel, 81, 1139-1146.
- Cebeci, Y., Ulusoy, U. ve Şimşek, S., 2002. Investigation of the Effect of Agglomeration Time, pH and Various Salts on the Cleaning of Zonguldak Bituminous Coal by Oil Agglomeration, Fuel, 81, 1131-1137.
- Chary, G.H.V.C., Gupta, A. ve Dastidar, M.G., 2015. Oil Agglomeration of Coal Fines in Continuous Mode of Operation, Particulate Science and Technology, 33, 17-22.

- Chary, G.H.V.C. ve Dastidar, M., 2012. Investigation of Optimum Conditions in Coal-Oil Agglomeration Using Taguchi Experimental Design, Fuel, 98, 259-564.
- Chary, G.H.V.C. ve Dastidar, M., 2010. Optimization of Experimental Conditions for Recovery of Coking Coal Fines by Oil Agglomeration Technique, Fuel, 89, 2317-2322.
- Chaurasia, R.C. ve Nikkam, S., 2016. A Suitable Process for Clean Coal Recovery from Tailing Pond Deposits, Energy Sources, Part A, 38, 3435-3439.
- Chen, S., Wang, S., Li, L., Qu, J., Tao, X. ve He, H., 2018. Exploration on the Mechanism of Enhancing Low-Rank Coal Flotation with Cationic Surfactant in the Presence of Oily Collector, Fuel, 227, 190-198.
- Chen, B., Lin, S., Wu, S., Li, W. ve Chen, W., 2013. Study on the Cleaning of Peifeng Coal with Oil Agglomeration, Procedia Environmental Sciences, 18, 338-346.
- Coleman, R.D., Sparks, B.D., Majid, A. ve Toll, F.N., 1995. Agglomeration-Flotation: Recovery of Hydrophobic Components from Oil Sands Fine Tailings, Fuel, 74, 1156-1161.
- Crozier, R.D., 1992. Flotation: Theory, Reagents and Ore Testing, Elsevier Science & Technology Books, New York, 362 s.
- Çiçek, T., Cöcen, İ., Engin, V.T. ve Cengizler, H., 2008. An Efficient Process for Recovery of Fine Coal from Tailings of Coal Washing Plants, Energy Sources, Part A, 30, 1716-1728.
- Çilek, E.C., 2006. Mineral Flotasyonu, SDÜ Basımevi, Süleyman Demirel Üniversitesi Yayın No: 59, Isparta, 165 s.
- Çuhadaroğlu, D., 1994. Zonguldak Lavuarı Filtrasyon Girişi -0,5mm Boyutlu Kömürün Yağ Aglomerasyonu, Flotasyon ve Agloflotasyon Yöntemleri ile Zenginleştirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Cui, H., Zhu, S., Xu, D. ve Chen, H., 2017. Preparation and Impact on Coal Flotation of Octanol Emulsion, Arabian Journal of Geosciences, 10, 1-8.
- Demiral, A., 2013. Killerin Elektrokinetik Özellikleri ve Flokülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Dizge, N., Uslan, M. ve Keskinler, B., 2007. Atık Yağların Değerlendirilme Potansiyellerinin Araştırılması. 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, 24-27 Ekim 2007, İzmir, 725-730.

- Duzyol, S., 2015. Investigation of Oil Agglomeration Behaviour of Tuncbilek Clean Coal and Separation of Artificial Mixture of Coal–Clay by Oil Agglomeration, Powder Technology, 274, 1–4.
- Engin, V.T., 2002. Kömür Yıkama Tesisleri İnce Atıklarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Erdem, A., Gülmez, A., Altun, O., Toprak, S., Olgun, Z. ve Gitmez, A., 2012. Fine Coal Recovery from The Ömerler Washery Tailings and Plant Applications, 26<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress (IMPC) 2012, New Delhi, Hindistan, Bildiriler Kitabı: 204-209.
- Erdem, A., Olgun, Z., Gülmez, A., Altun, O., Gitmez, A., Öteyaka, B. ve Koca, S., 2010. Benefication of Coal Fines from Tailing Ponds of Tunçbilek Washing Plant, 25<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010, Brisbane, Avustralya, Bildiriler Kitabı: 3737-3742.
- ETKB, 2016. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı, İlgili ve İlişkili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, Ankara.
- EÜAŞ, 2016. Elektrik Üretim Sektör Raporu, Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, İstatistik ve Araştırma Müdürlüğü, 37 s.
- Fuerstenau, D., Rosenbaum, J.M. ve Laskowski, J., 1983. Effect of Surface Functional Groups on the Flotation of Coal, Colloids and Surfaces, 8, 153-173.
- Garg, A., Lam, J.S.L. ve Panda, B.N., 2017. A Hybrid Computational Intelligence Framework in Modelling of Coal-Oil Agglomeration Phenomenon, Applied Soft Computing, 55, 402-412.
- Garcia, A.B., Matinez-Tarazona, M.R., Vega, J.G. ve Wheelock, T.D., 1998. On the Role of Oil Wetting in the Cleaning of High Rank Coals by Agglomeration, Fuel, 77, 387-392.
- Garcia, A.B., Martinez-Tarazona, M.R. ve Vega, J.G., 1996. Cleaning of Spanish High-Rank Coals by Agglomeration with Vegetable Oils, Fuel, 75, 885-890.
- Garcia, A.B., Vega, J.G. ve Martinez-Tarazona, M.R., 1995. Effects of Oil Concentration and Particle Size on the Cleaning of Spanish High-Rank Coals by Agglomeration with n-Heptane, Fuel, 74, 1692-1697.
- Gence, N., 2006. Coal Recovery from Bituminous Coal by Aggloflotation with Petroleum Oils, Fuel, 85, 1138-1142.
- Gezmiş, T.K., Oktay, Y. ve Şahiner, E.B., 2008. Gizli Tehlike Atık Yağlar. Üniversite Öğrencileri 3.Çevre Sorunları Kongresi(ÇESKO 2008), Fatih Üniversitesi kampüsü, İstanbul, 15-16 May. 2008, 408 s.



- Good, R.J., Badgujar, M.K., Huang, T.L.H ve Handur-Kulkarni, S.N., 1994. Hydrophilic Colloids and the Elimination of Inorganic Sulfur from Coal: A Study Employing Contact Angle Measurements, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 93, 39-48.
- Gouri Charan, T., 2016. Coal Benefication, Coal Production and Processing Technology, M.R. Riazi, R. Gupta, Eds., CRC Press, 231-262.
- Güleç, C., 1999. Küresel Yağ Aglomerasyonu Tekniği ile Kömürden Mineral Madde Uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gürses, A., Doymuş, K., Doğar, Ç. ve Yalçın, M., 2003. Investigation of Agglomeration Rates of Two Turkish Lignites, Energy Conversion and Management, 44, 1247-1257.
- Gürses, A., Doymuş, K. ve Bayrakçeken, S., 1997. Evaluation of Response of Brown Coal to Selective Oil Agglomeration by Zeta Potential Measurements of the Agglomerates, Fuel, 76, 1439-1444.
- Hanna, J. ve Kalathur, R., 1992. Recovery of Fine-Size Coal from Impounded Wastes, Minerals and Metallurgical Processing, 9, 174-179.
- Han, O., Kim, M., Kim, B., Subasinghe, N. ve Park, C., 2014. Fine Coal Benefication by Column Flotation, Fuel Processing Technology, 126, 49-59.
- Henry, C.D., 2012. Fine Coal Fine Coal Recovery, Coal Slurry Impoundment Structures, Thickener Underflow, and Other Unprocessed Slurry Waste from Existing Preparation Plant Discharges, Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources, C.A. Young, G.H. Luttrell, Eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 121-127.
- Honaker, R.Q., Kohmuench, J. ve Luttrell, G.H., 2013. Cleaning of Fine and Ultrafine Coal, The Coal Handbook Volume 1: Coal Production, D. Osborne, Ed., Woodhead Publishing Limited, 301-346.
- Honaker, R.Q., Das, A. ve Nombe, M., 2005. Improving the Separation Efficiency of the Knelson Concentrator Using Air Injection, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 25, 99-116.
- Honaker, R.Q. ve Das, A., 2004. Ultrafine Coal Cleaning Using a Centrifugal Fluidized-Bed Separator, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 24, 1-18.
- Honaker, R.Q., Paul, B.C., Wang, D. ve Huang, M., 1995. Application of Centrifugal Washing for Fine-Coal Cleaning, Mining, Metallurgy & Exploration, 12, 80-84.
- Jahani, M., 2018. Effect of Different Salt Solutions on Coal Flotation in the Absence of Frothers, International Journal of Mining and Geo-Engineering, (Baskıdaki Makale), 1-15, DOI: 10.22059/ijmge.2018.241506.594696.

- Jacques, M.T., Hovaronkura, A.D. ve Henry, J.D., 1979. Feasibility of Separation Processes in Liquid-Liquid solid systems: Free Energy and Stability Analysis, AICHE Journal, 25, 160-170.
- Kantarci, E.A., 2009. İnce Kömürün Santrifüjlü Konsantratör ile Zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karaoğlu, M., 1999. TKİ Alpagut-Dodurga Linyitleri İşletmesi Şlamlarından Kömürün Kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kawashima, Y., Furukawa, K. ve Takenaka, H., 1981. The Physicochemical Parameters Determining the Size of Agglomerate Prepared by the Wet Spherical Agglomeration Technique, Powder technology, 30, 211-216.
- Kawatra, S.K. ve Eisele, T.C., 2001. Coal Desulfurization: High-Efficiency Preparation Methods, Taylor & Francis, 360 s.
- Keller, D.V. ve Burry, W., 1987. An Investigation of a Separation Process Involving Liquid-Water-Coal Systems, Colloids and Surfaces, 22, 37-50.
- Kemal, M. ve Arslan, V., 1999. Kömür Teknolojisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No: 33, İzmir, 370 s.
- Kılınç, E., 2000. Toz Kömürlerin Yağ Aglomerasyonu ile Zenginleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kumar, S., Chary, G. ve Dastidar, M., 2015. Optimization Studies on Coal-Oil Agglomeration Using Taguchi (L16) experimental Design, Fuel, 141, 9-16.
- Kökkılıç, O., 2011. Falcon Santrifüjlü Gravite Ayırıcısında Zenginleştirmenin Modellenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Laskowski, J.S. ve Ralston, J., 1992. Colloid Chemistry in Mineral Processing, Elsevier Science, Amsterdam, 428 s.
- Laskowski, J.S., 1992. Oil Assisted Fine Particle Processing, Colloid Chemistry in Mineral Processing, J.S. Laskowski ve J. Ralston, Eds., Amsterdam, Elsevier, 361-394.
- Laskowski, J. S. ve Yu, Z., 2000. Oil Agglomeration and Its Effect on Beneficiation and Filtration of Low-Rank/Oxidized Coals, International Journal of Mineral Processing, 58, 237-252.
- Lin, S., Chen, B., Chen, W., Li, W. ve Wu, S., 2012. Study on Clean Coal Technology with Oil Agglomeration in Fujian Province, Procedia Engineering, 45, 986-992.
- Lin, Y. ve Liu, H., 1996. Zeta Potential of a Subbituminous Coal and Its Effect on Particle Agglomeration, Minerals and Metallurgical Processing, 13, 31-35.

- Majumder, A.K., Tiwari, V. ve Barnwal, J.P., 2007. Separation Characteristic of Coal Fines in a Knelson Concentrator- A Hydrodynamic Approach, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 27, 126-137.
- McCracken, T.W. ve Trass, O., 1994. Modified Oil Agglomeration Process for Coal Benefication: III. Grinding and Agglomeration Using Different Szego mill Design, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 72, 375-379.
- Mehrotra, V.P., Sastry, K.V.S. ve Morey, B.W., 1983. Review of Oil Agglomeration Techniques for Processing of Fine Coals, International Journal of Mineral Processing, 11, 175-201.
- Mehrotra, V., Sastry, K. ve Morey, B., 1980. Oil Agglomeration Offers Technical and Economical Advantages, Mining Engineering, 32, 1230-1234.
- Mort, P.R., 2005. Scale-up of Binder Agglomeration Process, Powder Technology, 150, 86-103.
- Mustafa, A., Ahmad, T., Akhtar, J., Shahzad, K. ve Sheikh, N., 2016. Agglomeration of Makarwal Coal Using Soybean Oil as Agglomerant, Energy Sources, Part A, 38, 3733-3739.
- National Research Council, 2002. Coal Waste Impoundments, 0-309-08251-X, Washington, DC.
- Netten, K.V., Moreno-Atanasio, R. ve Galvin, K.P., 2016. Selective Agglomeration of Fine Coal Using a Water-in-oil Emulsion, Chemical Engineering Research and Design, 110, 54-61.
- Netten, K.V., Moreno-Atanasio, R. ve Galvin, K.P., A, 2015. Kinetic Study of a Modified Fine Coal Agglomeration Process, Procedia Engineering, 102, 508-516.
- OECD/IEA, 2017a. World Energy Balances, IEA Publications, 2518-6442, 747 s.
- OECD/IEA, 2017b. Coal information, IEA Publications, 1683-4275, 500 s.
- OECD/IEA, 2017c. Electricity Information, IEA Publications, 2078-3442, 683 s.
- Oruç, F., 2006. Kil İçerikli Kömür Hazırlama Tesisi Atıklarından Temiz Kömür Üretimi ve Atık Kilin Tuğla Üretiminde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Osborne, D., 2012. Milestones in Fine Coal Cleaning Development, Fine Coal Processing, Dewatering, and Disposal, M.S., Klima, B.J., Arnold ve P.J., Bethel, Eds., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 3-32.
- Osborne, D., 1988. Flotation, Agglomeration and Selective Flocculation, Coal Preparation Technology, 1, 415-477.

- Öner, B., 2011. Konya-İlgın Kömürünün Polimerik Flokülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Özbayoğlu, G. ve Kemal, M., 2014. Kömür Zenginleştirme Yöntemleri, Cevher Hazırlama El Kitabı, G. Önal, G. Ateşok ve K.T. Perek, Eds., Yurt Madenciliği Geliştirme Vakfı, 285-301.
- Özdemir, O., 2013. Specific Ion Effect of Chloride Salts on Collectorless Flotation of Coal, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 49, 511-524.
- Özer, M., Basha, O.M. ve Morsi, B., 2017. Coal-Agglomeration Process: A Review, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 37, 3, 131-167.
- Özgen, S. ve Sezgin, O., 2014. Studies on Hydrocyclone to produce clean coal from Turkish Lignite Tailings (Tunçbilek/Kütahya and Soma/Manisa), El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 1, 12-18.
- Özgen, S., Malkoç, Ö., Doğançık, C., Sabah, E. ve Oruç Şapçı, F., 2011. Optimization of a multi Gravite Separator to Produce Clean Coal from Turkish Lignite Fine Coal Tailings, Fuel, 90, 1549-1555.
- Özgen, S., Türksöy, V.O., Sabah, E. ve Oruç, F., 2009. Process Development Studies on Recovery of Clean Coal from Ultra Fine Hardcoal Tailings Using Enhanced Gravity Separator, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 87, 715-725.
- Öztürk, M., 2004. Kullanılmış Bitkisel ve Hayvansal Yağlar, T.C Çevre ve Orman Bakanlığı Raporu, Ankara.
- Öztürk, F. ve Temel, H.A., 2013. Reverse Flotation in Muş-Elmakaya Lignite Benefication, Energy Source, Part A, 35, 695-705.
- Panda, L., Biswal, S.K. ve Tathavadkar, V., 2010. Benefication of Synthetic Iron Ore Kaolinite Mixture Using Selective Flocculation, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 9, 11, 973-983.
- Patil, D.P., Parekh, B.K. ve Klunder, E.B., 2010. A Novel Approach for Improving Column Flotation of Fine and Coarse Coal, International Coal Preparation Congress, Colorado, Bildiriler Kitabı, 404-412.
- Paulson, O. ve Pugh, R.J., 1996. Flotation of Inherently Hydrophobic Particles in Aqueous Solutions of Inorganic Electrolytes, Langmuir, 12, 4808-4813.
- Petela, R., Ignasiak, B. ve Pawlak, W., 1995. Selective Agglomeration of Coal: Analysis of Laboratory Batch Test Results, Fuel, 74, 1200-1210.
- Petela, R., 1991. Prediction of the Product Size in the Agglomeration of Coal Particles in a Water-Oil Emulsion, Fuel, 70, 509-517.

- Pietsch, W. 1991. Size Enlargement by Agglomeration, Handbook of Powder Science & Technology, M.E. Fayed ve L. Otten, Eds., International Thomson Publishing, New York, Wiley, 302-377.
- Puddington, I.E. ve Sparks, B.D., 1975. Spherical agglomeration processes, Minerals Science and Engineering, 7, 282-288.
- Rahmani, A., 2001. Effect of Surfactant on Spherical Oil Agglomeration of Coal (Research Note), International Journal of Engineering, 14, 281-288.
- Rao, D.V. ve Gouricharan, T., 2016. Coal Processing and Utilization, CRC Press, London.
- Rao, T.C. ve Vanangamudi, M., 1984. Quantitative Studies on the Coal-Oil Agglomeration Process, Powder Technology, 40, 195-205.
- Rao, T.C., Vanangamudi, M. ve Rao, K.H., 1982. Characteristic Curve for the Coal-Oil Agglomeration Process, International Journal of Mineral Processing, 9, 235-243.
- Sabah, E. ve Koltka, S., 2014. Separation Development Studies on the Beneficiation of Fine Lignite Coal Tailings by the Knelson Concentrator, Energy & Fuels, 28, 4819-4827.
- Sadowski, Z., Venkatadri, R., Druding, J., Markuszewski, R. ve Wheelock, R., 1988. Behavior of Oxidized Coal During Oil Agglomeration, Coal Preparation, 6, 17-34.
- Sastry, K.V.S. ve Cross, M., 1980. Basic and Applied Aspects of Pelletizing of Fine Particles, Fine Particles Processing, P. Somasundaran, Ed., AIME, New York, 1463-1493.
- Shah, C.L., Abbott, J.A., Miles, N.J., Xuejun, L. ve Jianping, X., 2002. Sulphur Reduction Evaluation of Selected High-Sulphur Chinese Coals, Fuel, 81, 519-529.
- Shrauti, S.M. ve Arnold, D.W., 1995. Recovery of Waste Fine Coal by Oil Agglomeration, Fuel, 74, 459-465.
- Sis, H., Ozbayoğlu, G. ve Sarıkaya, M., 2004. Utilization of Fine Coal Tailings by Flotation Using Ionic Reagents, Energy Sources, 26, 941-949.
- Skarvelakis, C. ve Antonini, G., 1995. Kinetics of Agglomerate Growth in a Continuous Coal-Oil Purification Process, Powder Technology, 85, 135-141.
- Steedman, W.G. ve Krishnan, S.V., 1987. Oil Agglomeration Process for The Treatment of Fine Coal, Fine Coal Processing, Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 179-204.
- Şahinoğlu, E. ve Uslu, T., 2015. Effects of various parameters on ultrasonic comminution of coal in water media, Fuel Processing Technology, 137, 48-54.

- Şahinoğlu, E. ve Uslu, T., 2014. Effect of Particle Size on Cleaning of High-Sulphur Fine Coal by Oil Agglomeration, Fuel Processing Technology, 128, 211-219.
- Şahinoğlu, E. ve Uslu, T., 2013. Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment, Fuel Processing Technology, 116, 332–338.
- Şahinoglu, E. ve Uslu, T., 2008. Amenability of Muzret Bituminous Coal to Oil Agglomeration, Energy Conversion and Management, 49, 3684–3690.
- Şimşek, S., 1999. Taşkömürünün Yağ Aglomerasyonu ile Zenginleştirilmesinde Bazı İşlem Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Taha, Y., Benzaazoua, M., Hakkou, R. ve Mansori, M., 2017. Coal Mine Waste Recycling for Coal Recovery and Eco-friendly Bricks Production, Minerals Engineering, 107, 123-138.
- Tao, D., 2004. Role of Bubble Size in Flotation of Coarse and Fine Particles- A Review, Separation Science and Technology, 39, 741-760.
- TKİ, 2017. Faaliyet Raporu, Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, Ankara, 105 s.
- TTKGM, 2016. Taşkömürü Sektör Raporu, Türkiye Taşkömürü Kurumu Genel Müdürlüğü, Ankara, 50 s.
- Türkkan, S.Y., 2006. Tunçbilek Tikner Altı Atık Kömürlerinin Kolon Flotasyonu Yöntemi İle Kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Tsai, S.C., 1982. Fundamentals of Coal Beneficiation and Utilization, Elsevier, New York, 392 s.
- Theodore, F.W., 1985. Oil Agglomeration for Fine Coal Recovery as Commercialized at Conoco/Consol, 4th International Symposium on Agglomeration, Iron and Steel Society, Jun. 2-5, 883-889.
- Uçar, A., Şensöğüt, C. ve Ediz, İ.G., 2017. Tunçbilek Kömür Hazırlama Tesisinde Bazı Fiziksel Çevre Etkenlerinin Araştırılması, Uluslararası Madencilik ve Çevre Sempozyumu, Bodrum, Turkey, T. Güler, M. Erdemoğlu ve E. Polat, Eds., 505-519.
- URL-1, <http://www.uky.edu/KGS/coal/images/download/?C=N;O=D>, 26 Ekim 2018.
- Ünalın, G., 2013. Kömür Jeolojisi, İkinci Baskı, 556, Eflal Ajans & Matbacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- Ünal, İ. ve Aktaş, Z., 2001. Effect of Various Bridging Liquids on Coal Fines Agglomeration Performance, Fuel Processing Technology, 69, 141-155.

- Ünal, İ. ve Erşan, M.G., 2005. Oil Agglomeration of a Lignite Treated with Microwave Energy: Effect of Particle Size and Bridging oil, Fuel Processing Technology, 87, 71-76.
- Ünal, İ. ve Erşan, M.G., 2007. Factors Affecting the Oil Agglomeration of Sivas-Divriği Uluçayır Lignite, Energy Sources, Part A, 29, 983-993.
- Valdes, A.F. ve Garcia, A.B., 2006. On the Utilization of Waste Vegetable Oils (WVO) as Agglomerants to Recover Coal from Coal Fines Cleaning Wastes (CFCW), Fuel, 85, 607-614.
- Vapur, H., Bayat, O. ve Uçurum, M., 2010. Coal Flotation Optimization Using Modified Flotation Parameters and Combustible Recovery in a Jameson Cell, Energy Conversion and Management, 51, 1891-1897.
- Wang, Q., Kashiwagi, N., Apaer, P., Chen, Q., Wang, Y., Maezono, T. ve Niida, D., 2011. Recovery of Combustible Matter from Waste Fine Chinese Coals by a Waste Vegetable Oil Agglomeration Process and Its Combustion Characteristics, Energy and Sustainability III, 143, 327-338.
- Wheelock, T.D., Milana, G. ve Vettor, A., 1994. The Role of Air in Oil Agglomeration of Coal at a Moderate Shear Rate, Fuel, 73, 1103-1107.
- Wen, W.W. ve Sun, S.C., 1981. An Electrokinetic Study on the Oil Flotation of Oxidized Coal, Separation Science and Technology, 16, 1491-1521.
- World Energy Council, 2016. World Energy Resources, 978 0 946121 58 8, London.
- Xia, Y., Zhang, R., Xing, Y. ve Gui, X., 2019. Improving the Adsorption Oily Collector on the Surface of Low-Rank Coal During Flotation Using a Cationic Surfactant: An Experimental and Molecular Dynamics Simulation Study, Fuel, 235, 687-695.
- Xie, G., Wu, L. ve Yu, H., 2010. The Selection of Fine Coal Flotation and Dewatering Technology in a Coal Preparation Plant, International Coal Preparation Congress, Colorado, Bildiriler Kitabı, 391-396.
- Yadav, A.M., Nikkam, S., Gajbhive, P. ve Tyeb, M.H., 2017. Modeling and Optimization of Coal Oil Agglomeration Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network Approaches, International Journal of Mineral Processing, 163, 55-63.
- Yadav, A.M., Sundaram, A., Ghag, K.P., Suresh, N. ve Gajbhiye, P., 2017. Recovery and de-Ashing of Coal Fines from Coal Water Slurry Using the Oil Agglomeration Process by Waste Transformer Oil, Energy Source, Part A, 39, 1353-1358.
- Yadav, A.N. ve Suresh, N., 2016. Recovery of Coal Fines from Coal Waste Slurry by Oil Agglomeration Process Using Linseed Oil, Energy Source, Part A, 38, 3453-3458.

- Yang, G.C.C., Markuszewski, R. ve Wheelock, T.D., 1988. Oil Agglomeration of Coal in Inorganic Salt Solutions, Coal Preparation, 5, 133-146.
- Yaşar, B., 2006. Türkiye’de Bitkisel, Hayvansal Atık Yağlar Sorunu ve Biyodizel Üretimi. Tarım ve Mühendislik Dergisi, 78-79, 63-64.
- Yasar, Ö., Uslu, T. ve Şahinoğlu, E., 2018. Fine Coal Recovery from Washery Tailings in Turkey by Oil Agglomeration, Powder Technology, 327, 29-42.
- Yavuz, M. ve Uslu, T., 2015. Desulphurization and Deashing of Fine Coal by Selective Oil Agglomeration Using Waste Motor Oil, Energy Sources, Part A, 37, 1996-2003.
- Yıldız, N., 2014. Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, 2. Cilt, 1504, Ertem Basım Ltd. Şti., Ankara.
- Yılmazel, H., 2010. Çatalağzı Termik Santralinde (ÇATES) Kullanılan Lavvar Atıklarındaki Kömürün Kazanımında Optimum Flotasyon Koşullarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yu, Z., 1998. Flocculation, Hydrophobic Agglomeration and Filtration of Ultrafine Coal, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Zhang, H., 2015. Effect of Electrolyte Addition on Flotation Response of Coal, Physicochemical Problems of Mineral Processing, 51, 257-267.



## 6. EKLER

### Ek 1. Şıamlı Atıkların Aglomerasyonu

Yağ Dozajı	Katı Oranı	Konsantre Kül (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)
%10	%5	43,81	13,24	95,80	9,04
	%10	44,41	15,68	94,90	10,58
	%15	49,72	19,20	92,27	11,48
	%20	45,91	13,30	95,41	8,71
%15	%5	45,98	14,92	94,83	9,76
	%10	43,33	14,28	95,56	9,84
	%15	42,72	15,15	95,40	10,55
	%20	48,27	15,58	94,08	9,66
%20	%5	44,59	13,76	95,49	9,25
	%10	43,91	17,19	94,53	11,71
	%15	43,24	15,14	95,31	10,44
	%20	44,99	15,03	95,00	10,03
%25	%5	44,07	14,59	95,32	9,91
	%10	41,48	18,34	94,71	13,05
	%15	44,54	16,56	94,59	11,15
	%20	44,08	15,32	95,09	10,41

**Ek 2. Sodyum Silikat Dozajının Aglomerasyona Etkisi**

<b>Dağıtıcı Cinsi</b>	<b>Dozaj (kg/ton)</b>	<b>Konsantre Kül (%)</b>	<b>Organik Malzeme Verimi (%)</b>	<b>Kül Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kül Ayırma Etkinliği (%)</b>
<b>Sodyum Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (%10 Katı Oranı)</b>	0	44,41	15,68	94,90	10,58
	0,1	44,33	15,62	94,94	10,56
	0,3	43,01	12,94	96,03	8,97
	0,5	45,51	12,56	95,73	8,29
	1	44,28	13,66	95,58	9,24
	4	46,07	14,39	95,00	9,39
	10	38,00	19,70	95,09	14,78
<b>Sodyum Silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) (%5 Katı Oranı)</b>	0	43,81	13,24	95,80	9,04
	0,1	48,93	14,72	94,26	8,97
	0,3	47,19	12,98	95,28	8,26
	0,5	45,31	13,61	95,40	9,01
	1	48,47	13,38	94,87	8,25
	4	48,53	13,67	94,74	8,41
	10	46,08	15,95	94,46	10,41

**Ek 3. Sodyum Triphosphate Dozajının Aglomerasyona Etkisi**

<b>Dağıtıcı Cinsi</b>	<b>Dozaj (kg/ton)</b>	<b>Konsantre Kül (%)</b>	<b>Organik Malzeme Verimi (%)</b>	<b>Kül Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kül Ayırma Etkinliği (%)</b>
<b>Sodyum Trifosfat (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (%10 Katı Oranı)</b>	0	44,41	15,68	94,90	10,58
	0,1	42,86	15,22	95,36	10,57
	0,3	46,42	13,64	95,19	8,83
	0,5	44,85	13,94	95,39	9,33
	1	45,69	13,85	95,26	9,11
	4	43,58	14,79	95,35	10,14
	10	33,35	23,94	95,13	19,06
<b>Sodyum Trifosfat (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (%5 Katı Oranı)</b>	0	43,81	13,24	95,80	9,04
	0,1	47,85	13,83	94,84	8,67
	0,3	44,50	12,78	95,83	8,61
	0,5	46,45	13,60	95,22	8,81
	1	45,36	12,94	95,64	8,58
	4	44,13	16,23	94,78	11,01
	10	37,20	21,02	94,96	15,98

**Ek 4. Sodyum Hexametaphosphate Dozajının Aglomerasyona Etkisi**

<b>Dağıtıcı Cinsi</b>	<b>Dozaj (kg/ton)</b>	<b>Konsantre Kül (%)</b>	<b>Organik Malzeme Verimi (%)</b>	<b>Kül Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kül Ayırma Etkinliği (%)</b>
<b>Sodyum Hekzametafosfat (Na(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) (% 10 Katı Oranı)</b>	0	44,41	15,68	94,90	10,58
	0,1	43,44	15,51	95,15	10,66
	0,3	44,62	15,54	94,90	10,44
	0,5	50,17	16,26	93,34	9,60
	1	43,21	13,84	95,71	9,56
	4	45,51	17,74	93,97	11,71
	10	34,82	23,53	94,89	18,41
<b>Sodyum Hekzametafosfat (Na(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) (% 5 Katı Oranı)</b>	0	43,81	13,24	95,80	9,04
	0,1	46,07	13,97	95,15	9,12
	0,3	46,60	13,18	95,31	8,49
	0,5	47,94	14,38	94,61	8,99
	1	41,02	16,10	95,44	11,54
	4	45,39	16,84	94,28	11,12
	10	39,23	22,46	94,11	16,58

### Ek 5. Yağ Dozajının Aglomerasyona Etkisi

Yağ Dozajı (%)	Katı Oranı (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
10	5	32,50	1,88	35,58	85,74	37,70	21,32	-26,72
	10	37,37	2,52	43,33	78,48	16,50	21,81	-40,17
	15	36,55	2,03	47,64	77,16	32,78	24,80	-19,58
	20	45,17	1,89	49,94	65,76	37,31	15,70	-12,75
15	5	32,00	2,45	48,91	80,85	18,87	29,75	-32,22
	10	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	15	35,77	1,70	50,93	76,39	43,71	27,32	-5,37
	20	41,18	1,57	56,08	67,33	47,93	23,41	4,00
20	5	31,26	2,61	44,86	83,02	13,57	27,88	-41,57
	10	38,02	2,45	47,53	75,73	18,87	23,26	-33,60
	15	38,60	1,28	42,72	77,64	57,61	20,36	0,33
	20	37,82	1,72	47,27	76,07	43,04	23,34	-9,68
25	%5	34,01	2,51	45,16	80,63	16,73	25,79	-38,11
	10	38,68	2,46	49,44	74,04	18,56	23,48	-31,99
	15	36,45	2,66	50,42	75,93	11,92	26,35	-37,66
	20	37,90	1,08	52,34	73,41	64,24	25,75	16,57

### Ek 6. Çeşitli Parametrelerin Aglomerasyona Etkisi

Parametre	Değişken	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
Yağ Cinsi	Atık Yağ	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	Gaz Yağı	39,11	2,56	22,63	87,90	15,23	10,53	-62,15
	Fuel Oil	32,31	2,26	40,90	83,76	25,16	24,65	-33,94
	Motorin	38,87	2,62	21,17	88,80	13,24	9,97	-65,59
	MotorYağı	38,50	2,72	26,78	86,05	9,93	12,83	-63,30
Karıştırma Hızı	1000	36,08	2,43	45,99	78,39	19,53	24,38	-34,48
	1200	34,54	2,24	44,48	80,47	25,82	24,95	-29,70
	1400	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	1600	32,69	1,56	47,77	80,69	48,34	28,46	-3,89
Karıştırma Süresi	2,5	38,57	1,96	43,01	77,52	35,10	20,54	-21,89
	5	38,07	1,95	46,30	76,31	35,43	22,61	-18,28
	10	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	15	30,80	1,47	48,64	81,98	51,32	30,62	-0,04
	20	28,94	1,28	46,80	84,14	57,61	30,94	4,41
pH	2	32,39	2,04	37,88	84,90	32,45	22,77	-29,68
	4	33,66	2,08	39,27	83,42	31,12	22,68	-29,61
	6,34	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	8	35,97	1,78	43,44	79,69	41,06	23,13	-15,51
	10	35,98	1,84	44,26	79,30	39,10	23,56	-16,64
Yıkama Suyu (Litre)	0,75	31,46	1,76	46,30	82,31	41,72	28,61	-11,98
	1,5	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	2,25	28,28	1,60	35,52	88,34	47,18	23,86	-17,30

**Ek 7. Aglomerat Kazanım Elek Boyutunun Aglomerasyona Etkisi (Kömür Tane Boyutu: -500  $\mu\text{m}$ )**

Tane ve Elek Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Yağ Dozajı (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
Tane Boyu -500 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 500 $\mu\text{m}$	5	39,37	2,32	41,36	77,65	23,15	19,01	-35,49
	10	37,37	2,52	43,33	78,48	16,50	21,81	-40,17
	15	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	20	38,02	2,38	47,53	75,73	21,32	23,26	-31,15
Tane Boyu -500 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 600 $\mu\text{m}$	5	45,55	2,04	41,82	70,55	32,40	12,37	-25,78
	10	44,19	2,06	41,73	72,38	31,76	14,11	-26,51
	15	38,68	2,06	45,69	75,91	31,76	21,60	-22,55
	20	38,13	1,97	50,50	74,04	34,64	24,54	-14,86
Tane Boyu -500 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 850 $\mu\text{m}$	5	47,12	1,56	13,73	89,42	48,34	3,14	-37,93
	10	35,20	1,52	19,90	90,76	49,67	10,66	-30,43
	15	30,79	1,38	23,44	91,17	54,30	14,60	-22,26
	20	34,49	1,42	36,33	84,07	52,98	20,40	-10,69

**Ek 8. Aglomerat Kazanım Elek Boyutunun Aglomerasyona Etkisi (Kömür Tane Boyutu: -300  $\mu\text{m}$ )**

Tane ve Elek Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Yağ Dozajı (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
Tane Boyu -300 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 300 $\mu\text{m}$	5	47,48	2,27	66,81	49,43	24,87	16,24	-8,32
	10	40,75	2,19	65,41	62,19	27,42	27,60	-7,17
	15	42,40	2,43	71,40	55,95	19,48	27,35	-9,12
	20	44,18	2,43	70,99	53,12	19,48	24,11	-9,52
Tane Boyu -300 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 500 $\mu\text{m}$	5	46,45	2,21	18,40	86,70	26,88	5,10	-54,72
	10	28,27	2,23	29,20	87,45	26,00	16,64	-44,80
	15	35,85	2,32	34,33	84,04	23,03	18,37	-42,65
	20	41,35	2,35	41,22	75,40	22,18	16,62	-36,60
Tane Boyu -300 $\mu\text{m}$ Elek Boyutu 600 $\mu\text{m}$	5	44,80	1,54	12,00	90,83	49,00	2,83	-39,00
	10	30,53	1,19	16,42	94,01	60,59	10,43	-22,98
	15	35,01	1,34	25,11	88,45	55,63	13,56	-19,27
	20	24,73	1,36	30,33	91,33	54,96	21,65	-14,71



**Ek 9. Aglomerat Kazanım Elek Boyutunun Aglomerasyona Etkisi (Kömür Tane Boyutu: -125 µm)**

Tane ve Elek Boyutu (µm)	Yağ Dozajı (%)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
Tane Boyu -125 µm	5	45,23	1,83	73,65	49,28	39,40	22,94	13,05
	10	46,58	2,20	75,24	45,39	27,15	20,63	2,39
Elek Boyutu 125 µm	15	46,03	2,43	74,82	46,76	19,53	21,58	-5,65
	20	44,44	1,83	78,56	47,62	39,40	26,19	17,96
Tane Boyu -125 µm	5	34,78	1,84	18,07	91,99	39,07	10,06	-42,86
	10	35,87	1,56	38,80	81,91	48,34	20,71	-12,85
Elek Boyutu 300 µm	15	36,10	2,06	42,86	79,32	31,78	22,18	-25,36
	20	30,59	1,64	38,86	85,72	45,69	24,58	-15,45
Tane Boyu -125 µm	5	18,24	2,53	8,06	98,34	16,23	6,40	-75,71
	10	17,28	2,37	6,42	98,87	21,50	5,29	-72,08
Elek Boyutu 500 µm	15	43,88	2,24	16,06	89,87	25,67	5,94	-58,27
	20	29,25	2,22	12,09	95,43	26,63	7,51	-61,28

Ek 10. CaCl<sub>2</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
CaCl <sub>2</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	38,79	1,77	56,84	70,02	41,39	26,86	-1,77
	200	30,33	1,62	58,80	78,70	46,35	37,50	5,16
	300	32,66	1,68	56,32	77,27	44,22	33,58	0,54
	400	29,92	1,95	56,49	79,93	35,37	36,41	-8,14
	500	40,02	2,02	58,85	67,32	33,11	26,17	-8,04

Ek 11. MgCl<sub>2</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
MgCl <sub>2</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	46,85	2,37	66,44	51,26	21,64	17,70	-11,92
	200	41,10	2,32	63,56	62,99	23,25	26,55	-13,19
	300	41,57	2,36	66,14	60,83	21,96	26,97	-11,90
	400	45,66	2,47	68,04	52,40	18,09	20,44	-13,86
	500	41,39	2,08	66,89	60,68	31,07	27,57	-2,04

Ek 12. BaCl<sub>2</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
BaCl <sub>2</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	43,84	2,19	65,39	57,26	27,44	22,65	-7,17
	200	44,84	2,42	64,01	56,70	19,86	20,70	-16,14
	300	46,46	2,37	67,25	51,43	21,50	18,68	-11,25
	400	45,51	2,37	65,69	54,34	21,50	20,02	-12,81
	500	43,67	1,97	65,98	57,42	34,70	23,40	0,67

Ek 13. AlCl<sub>3</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
AlCl <sub>3</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	31,82	1,83	45,98	82,14	39,40	28,12	-14,62
	200	31,17	1,29	63,97	75,90	57,28	39,86	21,25
	300	30,09	2,18	57,02	79,58	27,81	36,60	-15,17
	400	33,14	1,53	56,84	76,55	49,50	33,39	6,34
	500	34,24	2,17	53,19	76,95	28,14	30,13	-18,67

Ek 14. CuCl<sub>2</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
CuCl <sub>2</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	44,68	2,52	64,61	56,58	16,42	21,18	-18,98
	200	40,40	2,29	61,99	65,03	24,17	27,02	-13,84
	300	38,76	2,46	62,70	66,97	18,44	29,67	-18,86
	400	39,94	2,59	49,84	72,41	14,39	22,25	-35,77
	500	37,55	2,22	54,39	72,78	26,53	27,17	-19,08

Ek 15. ZnCl<sub>2</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi

Tuz Cinsi	Tuz Dozajı (mg/l)	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
ZnCl <sub>2</sub>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	28,88	1,84	52,37	82,30	39,12	34,67	-8,50
	200	30,35	1,19	59,33	78,48	60,59	37,81	19,92
	300	32,97	1,46	45,99	81,17	51,65	27,16	-2,35
	400	31,38	2,15	49,13	81,30	28,80	30,43	-22,07
	500	31,54	1,79	46,14	82,30	40,73	28,45	-13,13

**Ek 16. FeCl<sub>3</sub> tuzunun aglomerasyona etkisi**

<b>Tuz Cinsi</b>	<b>Tuz Dozajı (mg/l)</b>	<b>Kül (%)</b>	<b>Kükürt (%)</b>	<b>Organik Malzeme Verimi (%)</b>	<b>Kül Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kükürt Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kül Ayırma Etkinliği (%)</b>	<b>Kükürt Ayırma Etkinliği (%)</b>
<b>FeCl<sub>3</sub></b>	0	31,80	1,64	47,63	81,51	45,86	29,14	-6,51
	100	29,71	2,31	55,29	80,55	23,57	35,84	-21,14
	200	31,94	1,97	50,65	80,21	34,86	30,86	-14,49
	300	37,73	2,24	53,80	72,87	25,83	26,67	-20,37
	400	31,30	2,46	51,05	80,65	18,41	31,69	-30,54
	500	31,96	2,34	57,53	77,51	22,61	35,03	-19,87

## Ek 17. Sürfaktantların Aglomerasyona Etkisi

Sürfaktant Cinsi	Dozaj (kg/ton)	Kül (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)
<b>Sodyum Dodecil Sülfat</b>	0	31,80	47,63	81,51	29,14
	0,05	40,84	63,61	63,25	26,86
	0,09	43,78	70,87	53,92	24,79
	0,1	41,75	66,23	60,35	26,58
	0,11	45,11	71,21	51,30	22,51
	0,121	44,13	70,43	53,31	23,75
	0,165	46,16	70,56	49,65	20,22
<b>Triton X-405</b>	0	31,80	47,63	81,51	29,14
	0,0038	46,80	65,60	51,12	16,72
	0,0068	44,92	60,65	58,84	19,48
	0,0076	44,84	59,01	59,73	18,74
	0,0103	49,84	58,97	50,89	9,86
	0,0113	46,23	62,76	55,08	17,84
	0,0155	48,14	62,16	51,95	14,11
<b>Hexadesil Trimetil Amonyum Bromid</b>	0	31,80	47,63	81,51	29,14
	0,00085	45,62	64,99	54,78	19,77
	0,00153	47,75	66,54	49,49	16,03
	0,0017	48,77	64,68	48,59	13,27
	0,0018	46,06	63,50	54,90	18,39
	0,00198	46,69	62,90	53,85	16,75
	0,0027	44,61	67,38	54,83	22,22

**Ek 18. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında köpük alma süresinin aglomerasyona etkisi**

<b>Şartlandırma Süresi (dk)</b>	<b>Köpük Alma Süresi (dk)</b>	<b>Kül (%)</b>	<b>Kükürt (%)</b>	<b>Organik Malzeme Verimi (%)</b>	<b>Kül Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kükürt Azaltma Oranı (%)</b>	<b>Kül Ayırma Etkinliği (%)</b>	<b>Kükürt Ayırma Etkinliği (%)</b>
<b>0</b>	0,5	26,42	2,39	79,95	76,11	20,81	53,22	0,76
	1	29,79	2,48	82,30	70,98	17,88	53,27	0,17
	1,5	34,05	2,55	83,07	64,23	15,72	47,30	-1,22
	2	32,62	2,14	90,33	64,87	29,14	54,01	19,47
<b>3</b>	0,5	27,49	1,92	67,62	78,66	36,40	46,28	4,02
	1	28,07	1,83	85,19	72,33	39,49	57,52	24,68
	1,5	31,67	2,24	84,80	67,32	25,77	52,12	10,57
	2	33,95	2,42	86,34	63,23	19,99	49,57	6,34
<b>5</b>	0,5	30,57	2,42	67,82	75,15	19,83	42,97	-12,35
	1	32,20	2,29	78,48	68,92	24,07	47,40	2,54
	1,5	31,58	2,25	93,87	63,89	25,56	57,77	19,43
	2	30,51	2,45	92,25	66,24	18,94	58,48	11,19

**Ek 19. Flotasyon ile aglomerat kazanıldığında karıştırma hızının, köpürtücü miktarının ve tane boyunun aglomerasyona etkisi**

Parametre	Değişken	Kül (%)	Kükürt (%)	Organik Malzeme Verimi (%)	Kül Azaltma Oranı (%)	Kükürt Azaltma Oranı (%)	Kül Ayırma Etkinliği (%)	Kükürt Ayırma Etkinliği (%)
<b>Karıştırma Hızı (dev/dk)</b>	800	28,31	1,99	67,64	77,80	34,22	45,43	1,85
	1000	30,51	2,45	92,25	66,24	18,94	58,48	11,19
	1200	39,41	2,45	83,76	54,59	18,95	38,35	2,71
	1400	43,26	2,03	86,91	44,85	32,87	31,76	19,78
<b>Köpürtücü Miktarı (g/ton)</b>	0	30,51	2,45	92,25	66,24	18,94	58,48	11,19
	50	34,14	2,60	89,99	61,25	13,86	51,25	3,86
	100	34,83	2,59	85,45	61,99	14,14	47,44	-0,42
	150	34,36	2,49	84,62	63,14	17,66	47,75	2,28
	200	34,18	2,22	85,96	62,97	26,49	48,93	12,46
	250	34,38	2,58	83,23	63,70	14,54	46,93	-2,23
	300	34,42	2,58	82,05	64,16	14,54	46,21	-3,41
<b>Tane Boyutu (µm)</b>	500	30,51	2,45	92,25	66,24	18,94	58,48	11,19
	300	36,63	2,28	89,63	56,80	24,46	46,44	14,10
	125	38,58	2,27	92,65	51,55	24,86	44,20	17,51



### Ek 20. Kül Analizi

Kül analizi için kömür -250 µm boyutuna indirilir. Kül analizinin yapılacağı porselen krozeler yıkanıp etüvde kurutulur ve boş olarak tartımları kaydedilir (B). Krozelere 1.000 (± 0,0020) gram kömür konularak tekrar tartımları kaydedilir (A). Kül analizinde fırın sıcaklığı kademeli olarak artacak şekilde ayarlanır. Fırın 1 saatte 450-500 °C'ye 2. saatin sonunda 700-750 °C'ye ulaşır ve 2 saat bu sıcaklıkta bekletilir. Krozeler fırından çıkarılarak soğumaları için desikatöre alınır. Soğuyan krozelerin tartımları kaydedilir (C). Kömürün % kül içeriği aşağıdaki formül ile hesaplanır (ASTM-D 3174-89):

$$\text{Kül (\%)} = \left[ \frac{(A-B)}{C} \right] \times 100$$

### Ek 21. Nem Analizi

Nem analizi için porselen krozeye konulan kömürün tartımı yapılır. 105-110 °C'de etüvde bekletilir. Desikatörde soğutulduktan sonra tartımı yapılır. Ağırlık kaybının yüzdesel olarak farkı nemi verir (ASTM-D 3173-03).

### Ek 22. Uçucu Madde Analizi

Uçucu madde analizi için kömür -250 µm boyutuna indirilir. Platin krozelere 1.000 (± 0,0020) gram kömür konularak krozelerin kapakları kapatılır. Krozeler 7 dk 950 °C'deki fırında bekletilip çıkarılır. Soğuyan krozeler tartılır. Kömürdeki yüzde ağırlık kaybından yüzde nem miktarı çıkarılarak uçucu madde yüzdesi elde edilir (ASTM-D 3175-89)

### Ek 23. Sabit Karbon Analizi

Kömürün sabit karbon yüzdesi, kül, nem ve uçucu madde yüzdelерinin 100'den çıkarılmasıyla elde edilir (ASTM-D 3172-89)

$$\text{Sabit Karbon (\%)} = 100 - (\text{Nem (\%)} + \text{Kül (\%)} + \text{Uçucu Madde (\%)})$$

## ÖZGEÇMİŞ

Özüm YAŞAR, 2004 yılında İstanbul Üniversitesi (İ.Ü.) Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümüne başlayıp, 2008 yılında bölüm ikinciliği ile Maden Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2009 yılında İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Maden Mühendisliği Programında Yüksek Lisans eğitimini başlayıp, 2012 Haziran'da tamamlamıştır. 2012 Ağustos'unda Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atanmış ve doktora eğitimine başlamıştır. Bugüne kadar Doktora tezi kapsamında bir uluslararası indeksli makale, bir uluslararası makale ve dört bildiri yayınlanmıştır. K.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher ve Kömür Hazırlama Anabilim Dalı'nda araştırma görevliliğine devam etmektedir. Evli ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.

### **Doktora Tezinden Yapılan Yayınlar:**

#### **1. Makale ve Bildiriler**

Yaşar, Ö., Uslu, T. ve Şahinoğlu, E., 2018. Fine Coal Recovery from Washery Tailings in Turkey by Oil Agglomeration, *Powder Technology*, 327, 29-42.

Yaşar, Ö. ve Uslu, T., 2017. Effect of a Dispersant Agent in Fine Coal Recovery from Washery Tailings by Oil Agglomeration (Preliminary Study), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). (Earth Environ. Sci. 95 042057. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042057)

Yaşar, Ö. ve Uslu, T., 2017. Effect of Particle Size in Recovering of Coal Fines from Washery Tailings by Oil Agglomeration, 21st International Conference on Environment and Mineral Processing, 1-3.06.2017, Ostrava, Çek Cumhuriyeti, 143-146.

Yaşar, Ö. ve Uslu, T., 2017. Preliminary Study on Role of Desliming in Fine Coal Recovery from Coal Washeries by Oil Agglomeration, 16th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, 5-7 Ekim 2016, İstanbul, 1-3.

Yaşar, Ö. ve Uslu, T., 2016. İnce Kömürün Atıklardan Yağ Aglomerasyonu ile Kazanımında CaCl<sub>3</sub> Tuzunun Etkisinin Araştırılması Üzerine Ön Çalışma, International Black Sea Mining & Tunnelling Symposium, Trabzon, 507-510.

Yaşar, Ö. ve Uslu, T., 2016. Recovery Of Fine Coals From Tailings Of Tunçbilek Coal Washery By Oil Agglomeration (Preliminary Study), 15th International Mineral Processing Symposium, Istanbul-Turkey, 985-992.

## **2. Proje**

Lavvar atıklarındaki kömürlerin kazanımı, BAP-01, 9661, Araştırmacı.

