

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN DEĞİŞİK LİNYİTLERİN PİROLİZ
ÜRÜN VERİMLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

AYDAN AKSOĞAN KORKMAZ

DOKTORA TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞUBAT 2017

Tezin Başlığı: Zenginleştirme Yöntemlerinin Değişik Linyitlerin Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Etkisi

Tezi Hazırlayan: Aydan AKSOĞAN KORKMAZ

Sınav Tarihi: 09.02.2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı:

Doç.Dr. İsmail BENTLİ
İnönü Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Mehmet Sabri ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Hikmet SİS
İnönü Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Feridun BOYLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Yrd.Doç.Dr. Yunus ÖNAL
İnönü Üniversitesi

.....

Prof.Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Zenginleřtirme Yöntemlerinin Deđiřik Linyitlerin Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Etkisi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dūőecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Aydan AKSOĞAN KORKMAZ



ÖZET

Doktora Tezi

ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN DEĞİŞİK LİNYİTLERİN PİROLİZ ÜRÜN VERİMLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Aydan AKSOĞAN KORKMAZ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

210 + xvi sayfa

2017

Danışman: Doç. Dr. İsmail BENTLİ

Linyitlerimizin bilinen kullanım alanlarının dışında, teknolojik ürün olarak değerlendirilme yollarının araştırılması ülkemiz açısından önemlidir.

Bu tez çalışması kapsamında; Malatya-Arguvan, Sivas-Kangal ve Kahramanmaraş-Elbistan linyitlerinin öncelikle yüzdürme-batırma, sallantılı masa, Reichert spirali, Falcon konsantratörü ve flotasyon yöntemleriyle zenginleştirme çalışmaları yapılmıştır. Zenginleştirme yöntemleri içerisinde hem kül hem de kükürt uzaklaştırma açısından en başarılı yöntemin Reichert spirali olduğu belirlenmiştir. Zenginleştirme yöntemlerinin piroliz ve sıvılaştırma ürün verimleri ve katı ürünün kalitesi üzerine oldukça olumlu bir etkisinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ancak, teorik olarak mümkün olan bu çalışmanın ekonomikliğinin araştırılmasının gerekliliği açıktır.

Tez kapsamında çalışılan 3 linyitin de zenginleştirilmesinin gerekli olduğu, daha sonra kullanım alanlarına yönelik çalışmaların yapılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELE: Arguvan linyiti, Kangal linyiti, Elbistan linyiti, Yüzdürme-batırma, Sallantılı masa, Reichert spirali, Falcon konsantratör, Flotasyon, Piroliz, Sıvılaştırma.

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE EFFECTS OF ENRICHMENT METHODS ON PYROLYSIS PRODUCT YIELDS OBTAINED FROM DIFFERENT LIGNITES

Aydan AKSOĞAN KORKMAZ

Inonu University
Graduate School of Naturel and Applied Science
Department of Mining Engineering

208 + xvi pages

2017

Supervisor: Associated Professor Dr. İsmail BENTLİ

It is essential for our country to investigate the ways of evaluating our lignites as technological products rather than their widely known usage areas.

In the scope of the present thesis; first of all, the enrichment of lignites found in the regions of Malatya-Arguvan, Sivas-Kangal and Kahramanmaras-Elbistan was carried out by sink-float, shaking table, Reichert spiral, Falcon concentrator and flotation methods. It was found that Reichert spiral method is the most successful one among the others in terms of both ash and sulfur removal. It has been found out that the enrichment methods have a quite positive effect on pyrolysis and liquefaction product yield and quality of solid product. However, it is obvious that the exploring the economical dimension of this theoretically possible work is a necessity.

It has been concluded that the enrichment of the three lignites studied in the scope of the present thesis is necessary and after that the studies about their usage areas should be done.

KEYWORDS: Arguvan lignite, Kangal lignite, Elbistan lignite, Sink-float, Shaking table, Reichert spirals, Falcon concentrator, Flotation, Pyrolysis, Liquefaction.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç.Dr. İsmail BENTLİ'ye;

Piroliz deneyleri, XRD ve FTIR analizleri konusunda her türlü yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd.Doç.Dr. Yunus ÖNAL'a;

Sıvılaştırma deneylerinin yapılmasında her türlü desteği veren Sayın Doç.Dr. Tolga DEPCİ'ye;

Termal analizler konusunda her türlü yardımını gördüğüm Sayın Prof.Dr. Ahmet GÜLTEK'e;

Çalışmalarım boyunca her konuda bana destek olan Sayın Prof.Dr. Hikmet SİS'e;

Çalışmayı 2015/34 proje numarası ile maddi olarak destekleyen başta İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi olmak üzere mensubu olduğum İnönü Üniversitesi'ne;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi doktora çalışmalarım süresince de benden desteklerini esirgemeyen aileme ve özellikle eşim ve kızım İrem'e

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. Kömür Oluşumu.....	4
2.1.1. Turba oluşumu.....	4
2.1.2. Kömürleşme.....	4
2.2. Kömür Türleri.....	5
2.2.1. Turba.....	6
2.2.2. Linyit.....	6
2.2.3. Taşkömürü.....	6
2.2.4. Antrasit.....	7
2.3. Kömürlerin Sınıflaması.....	7
2.4. Kömürlerin Bazı Özellikleri.....	9
2.4.1. Rutubet içeriği.....	9
2.4.2. Kül içeriği.....	9
2.4.3. Uçucu madde içeriği.....	11
2.4.4. Sabit karbon içeriği.....	11
2.4.5. Kükürt içeriği.....	11
2.4.6. Karbon ve hidrojen içeriği.....	12
2.4.7. Azot içeriği.....	12
2.4.8. Oksijen içeriği.....	13
2.4.9. Isıl değer.....	13
2.4.10. Kömürlerdeki mineral madde içeriği.....	14
2.4.11. Kömürün iz element içeriği.....	15
2.5. Kömürlerin Petrografik Özellikleri.....	16
2.5.1. Kömürün makroskopik bileşenleri.....	17
2.5.2. Kömürün mikroskopik bileşenleri.....	18
2.6. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler.....	21
2.6.1. Yüzdürme-batırma.....	21
2.6.1.1. Optimum yıkanabilirlik derecesi (N) ve yıkanabilirlik sayısı (W).....	22
2.6.1.2. Yıkanabilirlik indeksi (GWI/IW).....	24
2.6.1.3. Yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI).....	26
2.6.2. Sallantılı masa.....	27
2.6.3. Falcon konsantratör.....	29
2.6.4. Reichert spirali.....	30
2.6.5. Flotasyon.....	32
2.6.6. Zeta potansiyel.....	35
2.6.7. Piroliz.....	36
2.6.8. Sıvılaştırma.....	40
2.7. Kaynak Özetleri.....	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55

3.1. Materyal.....	55
3.1.1. Malatya Arguvan linyiti.....	55
3.1.2. Sivas Kangal linyiti.....	62
3.1.3. Kahramanmaraş Elbistan linyiti.....	69
3.2. Yöntem.....	76
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	88
4.1. Arguvan Linyiti.....	88
4.1.1. Yüzdürme-batırma deneyleri.....	88
4.1.2. Sallantılı masa deneyleri.....	92
4.1.3. Reichert spirali deneyleri.....	95
4.1.4. Falcon konsantratör deneyleri.....	98
4.1.5. Flotasyon deneyleri.....	99
4.1.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	102
4.1.7. Piroliz deneyleri.....	103
4.1.8. Sıvılaştırma deneyleri.....	109
4.2. Kangal Linyiti.....	112
4.2.1. Yüzdürme-batırma deneyleri.....	112
4.2.2. Sallantılı masa deneyleri.....	116
4.2.3. Reichert spirali deneyleri.....	119
4.2.4. Falcon konsantratör deneyleri.....	123
4.2.5. Flotasyon deneyleri.....	124
4.2.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	126
4.2.7. Piroliz deneyleri.....	127
4.2.8. Sıvılaştırma deneyleri.....	133
4.3. Elbistan Linyiti.....	136
4.3.1. Yüzdürme-batırma deneyleri.....	136
4.3.2. Sallantılı masa deneyleri.....	141
4.3.3. Reichert spirali deneyleri.....	143
4.3.4. Falcon konsantratör deneyleri.....	147
4.3.5. Flotasyon deneyleri.....	148
4.3.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	150
4.3.7. Piroliz deneyleri.....	151
4.3.8. Sıvılaştırma deneyleri.....	157
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	161
KAYNAKLAR.....	167
EKLER.....	176

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kömürleşme sürecinin şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.2.	Yüksek kükürtlü kömürlerin oluşumu.....	12
Şekil 2.3.	Kangal linyiti için küllü ve külsüz malzemenin kazanım eğrileri.....	25
Şekil 2.4.	Sallantılı masadaki ayrışma bölgeleri.....	29
Şekil 2.5.	Falcon konsantratörün çalışma prensibi.....	30
Şekil 2.6.	Reichert spiralinin genel görünümü.....	31
Şekil 2.7.	Bir spiral hatvesinde taneciklerin hareketinin görünümü.....	31
Şekil 2.8.	Zeta potansiyelin şematik olarak gösterimi.....	36
Şekil 3.1.	Orijinal bazda Arguvan linyitinin elek analizi.....	56
Şekil 3.2.	Havada kuru baza göre Arguvan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi.....	57
Şekil 3.3.	Arguvan linyitinin XRD analiz sonucu.....	58
Şekil 3.4.	Arguvan linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü.....	60
Şekil 3.5.	Arguvan linyitinin FTIR spektrumu.....	61
Şekil 3.6.	Arguvan linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	62
Şekil 3.7.	Orijinal bazda Kangal linyitinin elek analizi.....	63
Şekil 3.8.	Havada kuru baza göre Kangal linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi.....	64
Şekil 3.9.	Kangal linyitinin XRD analiz sonucu.....	65
Şekil 3.10.	Kangal linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü.....	67
Şekil 3.11.	Kangal linyitinin FTIR spektrumu.....	68
Şekil 3.12.	Kangal linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	68
Şekil 3.13.	Orijinal bazda Elbistan linyitinin elek analizi.....	70
Şekil 3.14.	Havada kuru baza göre Elbistan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi.....	71
Şekil 3.15.	Elbistan linyitinin XRD analiz sonucu.....	72
Şekil 3.16.	Elbistan linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü.....	74
Şekil 3.17.	Elbistan linyitinin FTIR spektrumu.....	75
Şekil 3.18.	Elbistan linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	75
Şekil 3.19.	Çalışmaların gösterildiği genel akım şeması.....	76
Şekil 3.20.	Sallantılı masa deneylerinde kullanılan Wilfley masası.....	78
Şekil 3.21.	Falcon deneylerinde kullanılan Falcon L40 cihazı.....	78
Şekil 3.22.	Zenginleştirme deneylerinde kullanılan Reichert spirali.....	79
Şekil 3.23.	Flotasyon deneylerinde kullanılan Denver flotasyon cihazı.....	80
Şekil 3.24.	Zeta potansiyel ölçümü için kullanılan zetametre.....	80
Şekil 3.25.	Piroliz deneylerinde kullanılan tüp fırın.....	81
Şekil 3.26.	Sıvılaştırma deney düzeneğinin görünümü.....	81
Şekil 3.27.	Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan kesikli reaktör.....	82
Şekil 3.28.	Sıvılaştırma deneyinin akım şeması.....	84

Şekil 3.29.	Kömür sıvılaşma ürünlerinin sınıflandırılması.....	86
Şekil 4.1.	Arguvan linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	88
Şekil 4.2.	Arguvan linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe (lave) kükürt uzaklaştırma değişimi.....	89
Şekil 4.3.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi.....	90
Şekil 4.4.	Arguvan linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri.....	90
Şekil 4.5.	Arguvan linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri.....	91
Şekil 4.6.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi	93
Şekil 4.7.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi	93
Şekil 4.8.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi.....	94
Şekil 4.9.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	94
Şekil 4.10.	Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	95
Şekil 4.11.	Arguvan linyitinin Reichert spiralinde, tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	96
Şekil 4.12.	Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %15-25 katı oranlarında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	97
Şekil 4.13.	Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %15-25 katı oranlarında, bıçak konumunun kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	97
Şekil 4.14.	Arguvan linyitinin Falcon konsantratörde, tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	98
Şekil 4.15.	Arguvan linyiti ve kilinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri..	99
Şekil 4.16.	Arguvan linyitinin gazyağı ile flotasyonunda, tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	100
Şekil 4.17.	-150 µm boyutlu Arguvan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	101
Şekil 4.18.	Arguvan linyitinin şlam atılarak gerçekleştirilen flotasyon sonuçları....	102
Şekil 4.19.	Arguvan linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	104
Şekil 4.20.	Arguvan linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi.....	104
Şekil 4.21.	Arguvan linyitinin -3,35 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi.....	105
Şekil 4.22.	Arguvan linyitinin -3,35 mm tane boyutunda ve 500°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi..	106

Şekil 4.23.	Tüvenan Arguvan linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri.....	107
Şekil 4.24.	Tüvenan Arguvan linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri.....	107
Şekil 4.25.	Arguvan linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerinin FTIR analiz sonuçları.....	108
Şekil 4.26.	Kangal linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	113
Şekil 4.27.	Kangal linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe kükürt uzaklaştırma değişimi.....	114
Şekil 4.28.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi.....	115
Şekil 4.29.	Kangal linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri.....	115
Şekil 4.30.	Kangal linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri.....	116
Şekil 4.31.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi.....	117
Şekil 4.32.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	118
Şekil 4.33.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi.....	118
Şekil 4.34.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	119
Şekil 4.35.	Kangal linyitinin Reichert spiralinde, tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	120
Şekil 4.36.	Kangal linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	121
Şekil 4.37.	Kangal linyitinin Reichert spiralinde, tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	121
Şekil 4.38.	Kangal linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumunun kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	122
Şekil 4.39.	Kangal linyitinin Falcon konsantratörde tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	123
Şekil 4.40.	Kangal linyiti ve kilinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri.....	124
Şekil 4.41.	Kangal linyitinin gazyağı ile flotasyonunda, tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	125
Şekil 4.42.	-106 µm boyutlu Kangal linyitinin, flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	125
Şekil 4.43.	Kangal linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	127
Şekil 4.44.	Kangal linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi.....	128
Şekil 4.45.	Kangal linyitinin -4,75 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi.....	129

Şekil 4.46.	Kangal linyitinin -4,75 mm tane boyutunda ve 500°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi.....	129
Şekil 4.47.	Tüvenan Kangal linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri.....	130
Şekil 4.48.	Tüvenan Kangal linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri.....	131
Şekil 4.49.	Kangal linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerinin FTIR analiz sonuçları.....	132
Şekil 4.50.	Elbistan linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	137
Şekil 4.51.	Elbistan linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe kükürt uzaklaştırma değişimi.....	138
Şekil 4.52.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi.....	139
Şekil 4.53.	Elbistan linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri.....	140
Şekil 4.54.	Elbistan linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri.....	140
Şekil 4.55.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin, kül ve yanabilir verimine etkisi.....	141
Şekil 4.56.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin, kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	142
Şekil 4.57.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi.....	142
Şekil 4.58.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	143
Şekil 4.59.	Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	144
Şekil 4.60.	Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	145
Şekil 4.61.	Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	145
Şekil 4.62.	Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumunun lavede kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi.....	146
Şekil 4.63.	Elbistan linyitinin Falcon konsantratörde tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi.....	147
Şekil 4.64.	Elbistan linyiti ve kilinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri....	148
Şekil 4.65.	Elbistan linyitinin gazyağı ile flotasyonunda tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	149
Şekil 4.66.	-106 µm tane boyutlu Elbistan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi.....	150
Şekil 4.67.	Elbistan linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi.....	151
Şekil 4.68.	Elbistan linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi.....	152

Şekil 4.69.	Elbistan linyitinin -4,75 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi.....	153
Şekil 4.70.	Elbistan linyitinin -4,75 mm tane boyutunda ve 600°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi..	154
Şekil 4.71.	Tüvenan Elbistan linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri.....	154
Şekil 4.72.	Tüvenan Elbistan linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri.....	155
Şekil 4.73.	Elbistan linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerin FTIR analiz sonuçları.....	156
Ek Şekil 4.1.	Arguvan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri.....	180
Ek Şekil 4.2.	Arguvan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri	181
Ek Şekil 4.3.	Arguvan linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri	182
Ek Şekil 4.4.	Arguvan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	183
Ek Şekil 4.5.	Kangal linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri.	184
Ek Şekil 4.6.	Kangal linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri..	185
Ek Şekil 4.7.	Kangal linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri..	186
Ek Şekil 4.8.	Kangal linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	187
Ek Şekil 4.9.	Elbistan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri.....	188
Ek Şekil 4.10.	Elbistan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri	189
Ek Şekil 4.11.	Elbistan linyiti -31,5+19 mm boyut yüzdürme-batırma eğrileri.....	190
Ek Şekil 4.12.	Elbistan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri.....	191

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Ruhr kömür sınıflaması.....	7
Çizelge 2.2.	Kömürleşme derecelerine göre ASTM kömür sınıflaması.....	8
Çizelge 2.3.	Kömürlerdeki bazı mineraller.....	16
Çizelge 2.4.	Kömürlerdeki litotipler ve özellikleri.....	18
Çizelge 2.5.	Sert kömürlerdeki mikrolitotipler.....	21
Çizelge 2.6.	Yıkanabilirlik sayısına (W) göre üst tane boyutu ve yıkama prosesi seçimi.....	24
Çizelge 2.7.	Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler.....	35
Çizelge 2.8.	Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan çözücülerin fiziksel özellikleri...	43
Çizelge 3.1.	Arguvan linyitinin kısa analiz sonuçları.....	57
Çizelge 3.2.	Kangal linyitinin kısa analiz sonuçları.....	63
Çizelge 3.3.	Elbistan linyitinin kısa analiz sonuçları.....	70
Çizelge 3.4.	GC-MS sistemi analiz koşulları.....	87
Çizelge 4.1.	Arguvan linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri.....	91
Çizelge 4.2.	Arguvan linyitinin sallantılı masa ve Reichert spiriline beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri.....	92
Çizelge 4.3.	Arguvan linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.....	103
Çizelge 4.4.	Arguvan linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri.....	109
Çizelge 4.5.	Tüvenan Arguvan linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri.....	110
Çizelge 4.6.	Arguvan linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları.....	110
Çizelge 4.7.	Arguvan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri.....	111
Çizelge 4.8.	Arguvan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürünün GC-MS analiz sonuçları.....	112
Çizelge 4.9.	Kangal linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri.....	116
Çizelge 4.10.	Kangal linyitinin sallantılı masa ve spirale beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri.....	117
Çizelge 4.11.	Kangal linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.....	126
Çizelge 4.12.	Kangal linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri.....	133
Çizelge 4.13.	Tüvenan Kangal linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri.....	134
Çizelge 4.14.	Kangal linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları.....	134
Çizelge 4.15.	Kangal tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri.....	135
Çizelge 4.16.	Kangal tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürünün GC-MS analiz sonuçları.....	136
Çizelge 4.17.	Elbistan linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri.....	140

Çizelge 4.18.	Elbistan linyitinin sallantılı masa ve spirale beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri.....	141
Çizelge 4.19.	Elbistan linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması.....	150
Çizelge 4.20.	Elbistan linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri.....	157
Çizelge 4.21.	Tüvenan Elbistan linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri.....	158
Çizelge 4.22.	Elbistan linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları.....	158
Çizelge 4.23.	Elbistan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri.....	159
Çizelge 4.24.	Elbistan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürünün GC-MS analiz sonuçları.....	160
Ek Çizelge 2.1.	Arguvan linyitine ait elek analizi sonuçları.....	178
Ek Çizelge 2.2.	Kangal linyitine ait elek analizi sonuçları.....	178
Ek Çizelge 2.3.	Elbistan linyitine ait elek analizi sonuçları.....	178
Ek Çizelge 3.1.	Arguvan kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları.....	179
Ek Çizelge 3.2.	Kangal kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları.....	179
Ek Çizelge 3.3.	Elbistan kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları.....	179
Ek Çizelge 4.1.	Arguvan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	180
Ek Çizelge 4.2.	Arguvan linyitinin -19+4,75 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	181
Ek Çizelge 4.3.	Arguvan linyitinin -31,5+19 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	182
Ek Çizelge 4.4.	Arguvan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları.....	183
Ek Çizelge 4.5.	Kangal linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	184
Ek Çizelge 4.6.	Kangal linyitinin -19+4,75 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	185
Ek Çizelge 4.7.	Kangal linyitinin -31,5+19 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	186
Ek Çizelge 4.8.	Kangal linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları.....	187
Ek Çizelge 4.9.	Elbistan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	188
Ek Çizelge 4.10.	Elbistan linyitinin -19+4,75 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	189
Ek Çizelge 4.11.	Elbistan linyitinin -31,5+19 mm boyutunun yüzdürme-batırma sonuçları.....	190
Ek Çizelge 4.12.	Elbistan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları.....	191
Ek Çizelge 5.1.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları.....	193
Ek Çizelge 5.2.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları...	193

Ek Çizelge 5.3.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları.....	194
Ek Çizelge 5.4.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları.....	194
Ek Çizelge 5.5.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları.....	195
Ek Çizelge 5.6.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları...	195
Ek Çizelge 6.1.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre pülp te katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	196
Ek Çizelge 6.2.	Arguvan linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	197
Ek Çizelge 6.3.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre pülp te katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	198
Ek Çizelge 6.4.	Kangal linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	199
Ek Çizelge 6.5.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre pülp te katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	200
Ek Çizelge 6.6.	Elbistan linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi.....	201
Ek Çizelge 7.1.	Arguvan linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi....	202
Ek Çizelge 7.2.	Kangal linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi.....	202
Ek Çizelge 7.3.	Elbistan linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi...	203
Ek Çizelge 8.1.	Arguvan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları.....	204
Ek Çizelge 8.2.	-150 µm boyutlu Arguvan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları.....	204
Ek Çizelge 8.3.	Kangal linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları.....	204
Ek Çizelge 8.4.	-106 µm boyutlu Kangal linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları.....	205
Ek Çizelge 8.5.	Elbistan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları.....	205
Ek Çizelge 8.6.	-106 µm boyutlu Elbistan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları.....	205
Ek Çizelge 9.1.	Arguvan kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları.....	207
Ek Çizelge 9.2.	Arguvan kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları.....	207
Ek Çizelge 9.3.	Arguvan kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları.....	207
Ek Çizelge 9.4.	Kangal kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları.....	208
Ek Çizelge 9.5.	Kangal kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları.....	208
Ek Çizelge 9.6.	Kangal kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları.....	208
Ek Çizelge 9.7.	Elbistan kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları.....	209

Ek Çizelge 9.8.	Elbistan kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları.....	209
Ek Çizelge 9.9.	Elbistan kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları.....	209



SİMGELER VE KISALTMALAR

°C	Santigrat derece
9H	Yanma esnasında oluşan su miktarı
a	Beslenen kömürün külü
A	Kuru bazdaki kömürün külü
AS	Asfalten
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	Verilen herhangi bir yoğunlukta lavenin külü
b _{opt}	Optimum yıkanabilme derecesindeki kül içeriği
C	Lave (temiz) kömür miktarı
c	Lavedeki kül
C _A	Yüzen kısmın kül yüzdesi
DRNA	Küllü ve külsüz malzemenin kazanım verimleri arasındaki fark
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
DTG	Diferansiyel Termogravimetri
ERNM	Külsüz malzemenin kazanım verimi
F	Zenginleştirme ünitesine beslenen kömür miktarı
f	Beslemedeki kül
FTIR	Fourier Transform Infra Red
G	Merkezkaç kuvveti
GC-MS	Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
GWI/IW	Yıkanabilirlik indeksi
H _a	Alt ısı değer
H _A	Beslemedeki kül yüzdesi
H _ü	Üst ısı değer
İBTAM	İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi
K	Kelvin
k	Konsantrasyon kriteri
M	Mikst (ara ürün) miktarı
mbar	Milibar
MM	Kuru bazdaki kömürün mineral maddesi
MPa	Megapascal
MTA	Maden Tetkik ve Arama
mV	Milivolt
N	Yıkanabilirlik derecesi
NGMI	Yakın yoğunlukta malzeme indeksi
N _{opt}	Optimum yıkanabilme derecesi
PAS	Preasfalten
R _A	Küllü malzemenin verimi
R _N	Külsüz malzemenin verimi
S	Kuru bazdaki kömürün toplam kükürdü

T	Şist (artık) miktarı
t	Şistteki kül
TG	Termogravimetri
TGA	Termal Gravimetrik Analiz
THF	Tetrahidrofuran
UM	Uçucu madde
w	Verilen herhangi bir yoğunlukta lavenin yüzen miktarı
W	Yıkanabilirlik sayısı
W	Yakıt nem oranı
X	Beslenen kömüründe yüzen kısmın kümülatif miktarı
XRD	X-Ray Difraksiyon Toz Kırınımı
YV	Yanabilir verim



1. GİRİŞ

Ülkelerin gelişmişlik düzeylerinin en önemli göstergelerinden birisi enerji üretimidir. Enerji üretiminin tüketimden fazla olması, sanayinin gelişmesine ve milli gelirin artmasına neden olan önemli etkenlerden biridir. Enerji üretimi ise onu sağlayan kaynakların bulunmasına ve bu kaynaklardan optimum düzeyde yararlanılmasına bağlı olmaktadır. Bu açıdan günümüzde enerji kaynağı olarak kullanılan kömür, bitümlü şeyl, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar büyük önem taşımaktadır. Fosil yakıtlar sadece enerji hammaddesi değil, aynı zamanda birçok sanayinin de (boya, plastik, eczacılık, kozmetik, demir-çelik, alüminyum vb.) ana girdilerinin üretildiği hammaddelerdir (Kural, 1998).

Fosil yakıtlar; turba, linyit, taş kömürü, ham petrol ve doğal gazdır. En yaygın kullanılan fosil yakıt petroldür. Ancak petrolün rezervlerinin az olması alternatif kaynakların bulunmasını gerekli kılmaktadır. Kömür, petrole kıyasla daha ucuz ve daha boldur. Genel olarak kömür elektrik üretiminde kullanılmasına rağmen, diğer fosil yakıtlar gibi zengin bir hidrokarbon kaynağıdır (Hepbaşlı, 2004). Yeni teknolojiler ile petrol ve doğal gaz kaynaklarının genişletilmesine rağmen, uzmanlar önümüzdeki yüzyılda ucuz petrol kaynaklarının beklenenden daha erken bitebileceğini belirtmektedirler. Bu da kömürün ileride daha da önemli olacağını göstermektedir. 2030 yılında, dünya enerji ihtiyacının %45'inin kömürden karşılanacağı düşünülmektedir (Balat, 2007). BP Statistical Review of World Energy 2015 verilerine göre; dünya kömür rezervlerinin 115 yıl daha yeterli olacağı tahmin edilmektedir (www.bp.com). Bunun yanında diğer fosil yakıtlardan, petrolün 39 yıl ve doğal gazın ise 63 yıl sonra dünyadaki rezervlerinin tükeneceği tahmin edilmektedir (Schobert ve Song, 2002; Demirbaş, 2007).

Kömürler havanın oksijeniyle kendiliğinden yanabilen, %55-95 arasında serbest karbon veya bileşim halinde karbon içeren, katı ve organik kökenli kayaçlardır. Yandıklarında değişik miktarda ve bileşimde kül bırakmaktadırlar. Genel olarak bitkisel kökenlidirler. Sert, yumuşak, mat veya parlak olabilmektedirler. Renkleri kahverengiden siyaha kadar değişebilmektedir. Gelişme derecelerine göre gözle veya mikroskopla ayırt edilebilen, iyi veya kötü muhafaza edilmiş bitkisel artıklar içermektedirler. Kendi aralarında turba, linyit, taşkömürü ve antrasit gibi sınıflara ayrılmaktadırlar. Tüm bu kömürel gruba hümülit adı verilmektedir (Köksoy, 1985). Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık büyük çoğunluğu fosil yakıtlar kullanılarak elde edilmektedir. Bu fosil yakıtlar arasında en yaygın olarak kullanılan linyitlerdir. Dünya linyit rezervlerinin yaklaşık %0,85'i ülkemizde bulunmaktadır (Peker Say, 2006; Ballice, 2002).

Ülkemizde 2005-2012 yılları arasında yaklaşık 5,8 milyar ton linyit rezervi artışı sağlanmıştır. 2005 yılında 8,3 milyar ton olan linyit rezervleri 2012 yılı sonu itibarıyla 14 milyar tonu bulmuştur. Ayrıca Türkiye 519 milyon ton görünür ton taşkömürü rezervine sahiptir (www.enerji.gov.tr/tr-TR/sayfalar/komur). Türkiye'nin hemen hemen her bölgesinde linyit

oluşumlarına rastlanmaktadır. Türkiye linyit rezervlerinin %37'sini oluşturan, en büyük rezerv Elbistan'da bulunmaktadır. Diğer büyük rezervler Orta ve Kuzey Batı Anadolu ve Ege bölgesindedir (Balat, 2008a; Yılmaz, 2008; Ediger vd. 2014; Özbayoğlu ve Arslan, 2013). Linyit rezervi açısından zengin bir ülke olmamıza karşılık yüksek değerli linyitlerimizin miktarı azdır. Nem ve kül içeriği yüksek olan, düşük ısı değerli linyitlerin miktarı ise toplam rezervlerin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yüksek kalitede linyitler ev ısıtmasında ve endüstride, düşük kalitedeki linyitler ise daha çok termik santrallerde kullanılmaktadır. Linyitlerimiz teshinde ve sanayide az oranda kullanılmakta, kullanıldığı takdirde de ciddi çevre sorunları yaratmaktadır. Oysaki mevcut ve yeni teknolojileri uygulayarak, kömürün temiz bir şekilde ve çevre kirliliği yaratmadan kullanılması mümkün olmaktadır. Temiz kömür teknolojileri kömür üretme, hazırlama ve kullanımının çevresel bakımdan uygunluğunu ve verimliliğini geliştirmek için tasarlanan yeni tekniklerdir. Bu teknolojiler gaz emisyonunu ve atık miktarını azaltarak, birim kömürden elde edilen enerjiyi arttırmaktadır (Erdem vd. 2009).

Kömürün kullanım alanları her ne kadar ağırlıklı olarak elektrik üretimi, demir-çelik sanayi, çimento sektörü, ısınma olsa da diğer önemli kömür kullanıcıları alümina rafinerileri, kağıt fabrikaları, kimya ve ilaç fabrikalarıdır. Birçok kimyasal madde, kömürün sıvılaştırma ve gazlaştırma sonrası yan ürünlerinden elde edilmektedir. Rafine kömür katranı kreozot yağı, naftalin, fenol ve benzen gibi kimyasalların üretiminde; kok fırınlarından elde edilen amonyak gazı amonyak tuzları, nitrik asit ve tarımsal gübre üretiminde kullanılmaktadır. Sabunlar, aspirinler, solventler, boyalar, plastik ve fiberler gibi birçok değişik ürün kömür ve yan ürünlerini içermektedir. Kömür ayrıca aktif karbon, karbon fiber, silikon gibi özel ürünlerin üretiminde de gerekli bir katkı maddesidir (Leonard ve Hardinge, 1991).

Türkiye'nin enerji tüketimi 1980'lerin başından itibaren belirgin bir şekilde artmaya devam etmektedir. Türkiye, giderek artan enerji ihtiyacında dışa bağımlılığı azaltacak ve güvenilir bir şekilde tüketilmesine olanak sağlayacak enerji kaynaklarından linyit kömürü dışında önemli bir fosil yakıt rezervine sahip değildir. Dolayısıyla enerji ihtiyacının karşılanmasında, linyit kömüründen faydalanmak zorunlu bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Uzun yıllar çevresel etkilerinden dolayı yeterince kullanılmayan linyit kömürleri arama, üretim ve tüketim aşamalarında daha verimli, daha temiz ve daha ekonomik bir şekilde faydalanılmasına olanak sağlayacak uygun teknolojilerin kullanılmasıyla, enerji tüketiminde uzun bir süre daha kullanılabilecek önemli bir yerli kaynaktır (Balat, 2008b).

Türkiye'de toplam linyit rezervleri içinde %17,3 oranında bulunan alt ısı değeri 3000 kcal/kg'ın üzerindeki iyi kalitede olan linyitlerin bir süre sonra artan ihtiyacı karşılayamayacağının anlaşılması üzerine, kül ve nem oranı yüksek, düşük ısı değerli linyitlerimizi yüksek verimle elektrik enerjisine dönüştürme çalışmalarının yanı sıra, kimyasal hammadde sektörü için de çalışmalar yapılmaktadır (Tekeş vd. 2002).

Kömür; olduğu gibi veya yakıt olarak tam verim elde edebilmek amacıyla, özelliklerine göre çeşitli proseslerden geçirilmek suretiyle farklı özelliklerdeki ürünler halinde de kullanılabilen bir yakıttır. Son yıllarda, kömürün özelliklerine göre en uygun ürün haline dönüştürülüp kullanılması, çağdaş bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır. Kömüre uygulanan başlıca prosesler arasında düşük ve yüksek sıcaklık koklaştırması, gazlaştırma, sıvılaştırma ve briketleme sayılabilmektedir (Asmatülü vd. 1996).

Son zamanlarda ülkemizde yapılan çalışmalar arasında özellikle piroliz ve ekstraksiyon gibi yöntemler üzerine odaklanılmıştır. Kömürün gerek sıvı yakıt, gerekse kimyasal hammadde gereksinimlerini karşılamak üzere, yüksek enerji yoğunluğu olan, kolayca depolanıp taşınabilecek ve çevre kirliliğini azaltacak sıvılara dönüştürülmesi olan kömür sıvılaştırma işleminde, kömürün hidroaromatik yapısı parçalanarak, oluşan kararsız parçacıklar kararlı hale getirilmektedir. Isıl parçalanmaya dayanan en basit sıvılaştırma yöntemi pirolizdir (Tekeş vd. 2002).

Yüksek uçuculu linyit kömürlerinin yakılmasında farklı yollar izlenebilir. Bunlardan birincisi kömürün özel yakma sistemlerinde yüksek verim ile yakılması; ikincisi ise düşük sıcaklık koklaştırması ile (semi-koklaştırma) kömürdeki uçucu maddenin uzaklaştırılması ve daha sonraki aşamada konvansiyonel yakma sistemlerinde semi-kokun yakılmasıdır. Kömürün oksijensiz ortamda 300-650°C arasındaki karbonizasyonuna “Düşük Sıcaklık Karbonizasyonu” adı verilmektedir. Düşük sıcaklık karbonizasyonundan elde edilen ürünler; katı karbonsal atık (semi-kok/yarı kok), sıvı (katran) ve gaz olmak üzere üç grup altında toplanmaktadır (Asmatülü vd. 1996).

Düşük sıcaklık karbonizasyonundan elde edilen ürünlerin miktarı, kömürün bileşimine ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bununla beraber, kömürün içerdiği mineral madde yüzdesi ile ürünler arasında belirgin bir ilişki vardır. Uçucu madde yüzdesi arttıkça, karbonizasyon sonucu elde edilen kok yüzdesi azalmakta, buna karşılık katran ve gaz yüzdeleri ise artmaktadır. Semi-kokun yanında bu sıvı ve gaz ürünlerin veriminin arttırılması sayesinde, kömürden optimum fayda elde edilebilecektir (Çelik, 2002).

Bu tez çalışmasında; Malatya-Arguvan linyiti, Kahramanmaraş-Elbistan linyiti ve Sivas-Kangal linyitlerinin öncelikle tüvenan halde pirolizi ve sıvılaştırma deneyleri sonucunda elde edilen katı (semi-kok/çar), sıvı ve gaz ürün verimlerinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Daha sonra yüzdürme-batırma, sallantılı masa, Reichert spirali, Falcon konsantratörü ve flotasyon zenginleştirme yöntemleri kullanılarak zenginleştirilmiş ürünlerin pirolizi ve sıvılaştırma deneyleri yapılmış ve ürün verimlerinin değişimine bakılmıştır. Sonuçta, kömür örneklerinin hangilerinin semi-kok, hangilerinin sıvı ya da gaz ürün eldesinde kullanılabileceği belirlenmiş, zenginleştirme yöntemlerinin piroliz ve sıvılaştırma ürün verimlerine etkisi ortaya konmuştur. Literatürde zenginleştirme yöntemlerinin piroliz ve sıvılaştırma ürün verimlerine etkisiyle ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Kömür Oluşumu

Bir sedimanter havzanın bataklık alanlarında biriken bitki kalıntıları (organik madde) jeolojik zaman içinde üzerine depolanan diğer çökellerin altında kalarak gömülmektedir. Gömülme havzanın jeolojik yapısına göre, belli bir derinliğe kadar devam ederek son bulmaktadır. Bu süreçte çökeller taşlaşırken, organik madde kömürleşmektedir. Daha sonra havzanın kapanmasıyla birlikte çökeller kıvrımlanarak, yükselmekte ve aşınmaktadır. Cansız organik maddenin turbaya dönüşmesine turbalaşma, turbanın sırasıyla linyit, alt bitümlü kömür, taşkömürü ve antrasite dönüşmesine ise kömürleşme adı verilmektedir (Ünal, 2010).

2.1.1. Turba oluşumu

Turbalıkta çökelen organik maddeler bakteri faaliyetleri sonucu hidroliz, oksitlenme ve indirgenme süreçlerini içeren biyokimyasal değişikliklere uğramakta ve böylece turba gelişmektedir. Turba oluşumu sırasında, önce organik maddelerden hümitik asitler meydana gelmektedir. Hümitik asitlerin asidik karakterlerini kaybetmesi sonucu hüminler oluşmaktadır. Hümin ve bozunmakta olan organik madde turba olarak isimlendirilmektedir. Bataklıkta büyüyen bitkiler bataklıktaki organik sedimantasyonu sağlamalarının yanı sıra, bataklığı akarsu taşkınlarından koruma görevi de görmektedirler. Bataklıklardaki su seviyesi, turba oluşumu açısından önemlidir. Bataklık kuruyacak olursa, aşırı oksitlenme nedeniyle turba oluşmayabilir. Bataklıktaki su derinliği çok olursa, turba yerine organik çamur veya kömür dışı sedimentler çökecektir. Bir turba bataklığının değişik kesimlerinde su seviyesine, tuzluluğa ve temel kayaç türüne bağlı olarak farklı bitki toplulukları ve değişik özelliklere sahip turbalar gelişmektedir (Kural, 1998).

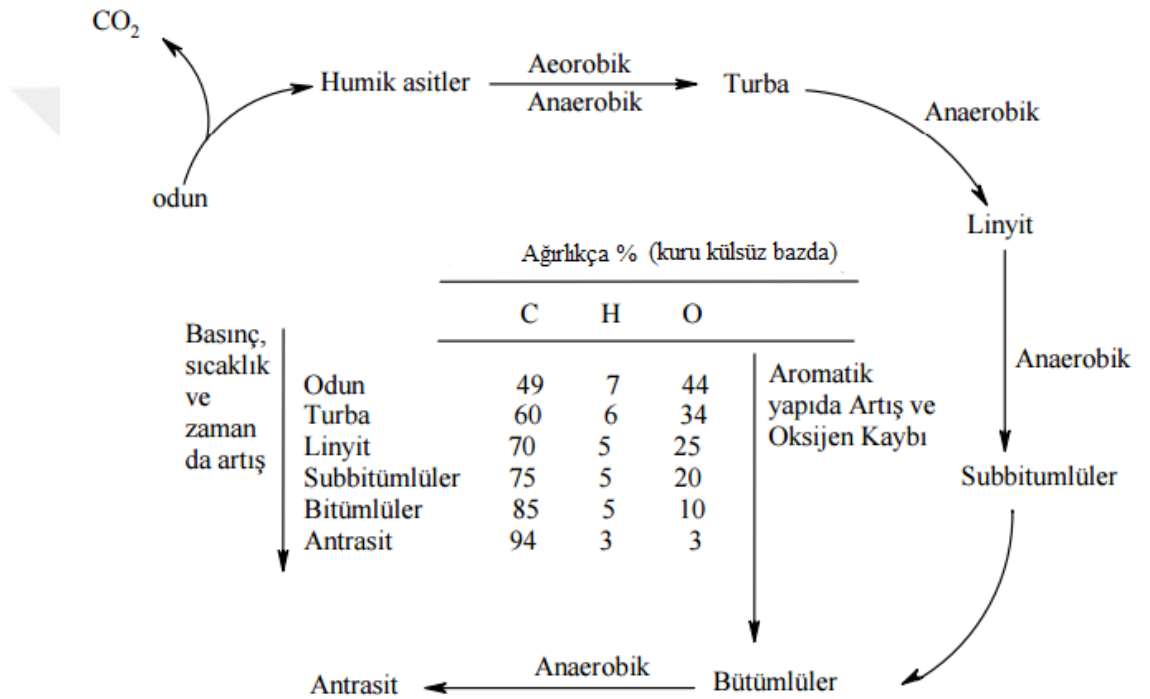
Bir turba bitkilerin büyüdüğü yerde gelişirse otokton, bitkilerin taşınmaları sonucu gelişirse allokton oluşum olarak adlandırılmaktadır. Otokton turbalar, kömür damarının taban kayacı içindeki kök izlerinin varlığıyla kolayca tanımlanabilmektedir. Ancak, kök izlerinin yokluğu bitkilerin taşınmış olduğunu göstermeyebilir. Kömür jeolojisi çalışmaları, çoğunlukla işletilebilir ve kalın kömür damarlarının genellikle otokton turbalardan meydana geldiğini göstermektedir (Kural, 1998).

2.1.2. Kömürleşme

Kömürleşmenin; bitkilerdeki selülozun mikrobiyolojik bozunması, hümitik maddelerin linyine dönüşümü ve daha büyük kömür molekülleri içinde bu hümitik maddelerin yoğunlaşması olmak üzere jeokimyasal olarak 3 proseten oluştuğunu söylemek mümkündür. Bitki türleri, bitki ve bitki artıklarının çürümesi, depolanma şartları, yerkaşu hareketleri gibi etkenlerin etki durumlarına göre değişik kömür türleri oluşmaktadır (Miller, 2005).

Biyokimyasal kömürleşmede, bakteriyel bir kömürleşme hüküm sürmektedir. Burada kömür oluşabilmesi için, bitkinin hava ile hiç temas etmemesi veya çok az temas etmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, bitki tamamen parçalanarak CO₂ ve H₂O'ya ayrılmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010).

Jeokimyasal kömürleşme sürecinde, kömür basınç ve ısı altında kalmaktadır. Basınç ve ısının derecesine göre, linyitten antrasite kadar çeşitli özellikteki kömürler bu süreçte oluşmaktadır. Düşük sıcaklık ve düşük basınçta linyit, yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta antrasitlerin oluştuğu ve diğer kömür cinslerinin de bu aralıkta yer aldığı kabul edilmektedir (Kemal ve Arslan, 2010). Kömürleşme sürecinin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Kömürleşme sürecinin şematik gösterimi (Speight, 1994)

Kömürleşme süresince, kömürün nem ve uçucu madde içeriği azalırken, karbon içeriği artmaktadır. Örneğin; kuru-mineral maddesiz bazda otsu bitkilerde ve odunda %50 civarında bulunan karbon; turbada %60'a, linyitte %70'e, yarı bitümlü kömürde %75'e, bitümlü kömürde %80-90'a ve antrasitte ise %90'ın üzerine çıkmaktadır (Miller ve Tillman, 2008).

2.2. Kömür Türleri

Kömürleşme sürecinde genel olarak C, H, O ve belirli oranda da S ve N içeren bitki yapısından, çeşitli bileşiklerin ayrışması sonucu değişik türde kömürler oluşmaktadır. Genel

olarak kömür türleri turba, linyit, taşkömürü ve antrasit olmak üzere 4 ana grup altında toplanmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010).

2.2.1. Turba

Biyokimyasal kömürleşmeye uğramış en genç kömür türüdür. Rengi sarı, kahverengi ve siyah olabilen turbaların sertliği azdır. Turbalarda odunumsu yapıyı görmek mümkündür. Uçucu madde (>%60) ve orijinal nem (>%75) içerikleri çok yüksektir. Havada kuruyan turba %20-35 nem içerir. Turbalar havada kurutulduktan sonra yakıt olarak kullanıldığı gibi, düşük küllü olanları semi-kok ve aktif kömür yapımında da kullanılmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010).

2.2.2. Linyit

Linyit, kömürleşme olayının ilk aşamasını temsil eden en düşük ranklı kömürdür. Kahverengi kömürler özelliklerine göre yumuşak ve sert (mat ve parlak) kahverengi kömürlere ayrılmaktadır (Köksoy, 1985).

- *Yumuşak linyit*: Yumuşak kahverengi kömür, açık veya koyu kahve renkli, mat ve toprağımsıdır. Turbaya benzer, ancak ondan daha yoğun ve katıdır. Çoğu kahverengi kömürlerde mikroskopik olarak odun ve yaprak kalıntıları, iyi korunmuş bitki dokuları görülebilir. Ocaktan çıkarılmış yumuşak linyit %35-75 arasında nem içerir. Isıl değeri 4000 kcal/kg'dan küçüktür. Karbon içeriği genelde %60-70 arasındadır.

- *Mat linyit*: Yumuşak kahverengi kömür turbaya, mat kahverengi kömür ise daha çok taşkömürüne benzer. Mat linyit, yumuşak linyite göre daha katı, daha koyu renkte ve oldukça iyi tabakalıdır. Mikroskopta nadiren bitki kalıntıları gözlenebilir. Ocaktan çıkarılmış mat linyit %25-30 nem içerir. Isıl değeri 4000-5000 kcal/kg'dır. Karbon içeriği genellikle %70-71'dir.

-*Parlak linyit (alt bitümlü kömür)*: Parlak kahverengi kömürlerin taşkömürlerinden ayrılması oldukça güçtür. Bu yüzden linyit-taşkömürü arasındaki geçiş kömürleri, American Society for Testing and Materials (ASTM) sınıflandırmasında alt bitümlü kömürler olarak sınıflandırılmıştır. Parlak kahverengi kömür, siyah renkli ve parlaktır. Ocaktan çıkarılmış parlak linyit %8-25 nem içerir. Nem içeriğindeki azalış, kısmen parlak linyitteki gözenekliliğin azalması sonucudur. Isıl değeri 5500-7000 kcal/kg arasındadır. Karbon içerikleri ise genellikle %71-77'dir.

2.2.3. Taşkömürü

Bitümlü kömür olarak da adlandırılır. Koyu gri-siyah renkli ve serttir. Genellikle az veya çok bantlı yapıya sahiptir. Bu kömürlerin parlaklığı, farklı bantlara göre değişiklik gösterir. Bu bantlar parlak ve mat olabilir. Ocaktan çıkarılmış taşkömürü genellikle %8'den az nem içerir. Isıl değeri 7000 kcal/kg'dan, karbon içeriği ise genellikle %77'den daha fazladır.

2.2.4. Antrasit

Bu kömürler mat veya demir siyahı renginden, metalik cilaya kadar değişen özellikleri ile karakteristiktir. Çoğunlukla antrasitin kalorifik değeri, taşkömüründen daha azdır. En sert kömür türüdür. Bazı bölgelerden elde edilen antrasit türlerinden parlatmak suretiyle süs eşyası yapılabilir. Nem içeriği %1-3 arasındadır (Köksoy, 1985).

2.3. Kömürlerin Sınıflaması

Kömürler değişik ülkeler tarafından, değişik parametreler dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar genellikle sanayileşmiş ve sanayisinde fazla miktarda kömür kullanan ABD, Almanya, İngiltere gibi ülkeler tarafından yapılmaktadır (Ünalın, 2010).

Seyler sınıflaması: En eski kömür sınıflamalarından biridir. Kömüre ait organik maddenin C ve H oranlarını dikkate alan, bununla birlikte kömürün uçucu madde içeriği, kalorifik değeri ve şişme indeksini de göz önünde bulunduran karmaşık bir sınıflamadır.

İngiliz NCB sınıflaması: NCB (National Coal Board) tarafından yapılmış ve kömürün uçucu madde oranı ile Gray-King indeksine dayalı olan bir sınıflamadır. Yalnızca taşkömürü ve antrasitler için geçerlidir.

Alpern sınıflaması: Hümik ve sapropelik kömürlerin tamamını kapsar. Linyitler için, nem tutma kapasitesi ile kalorifik güç; taşkömürü ve antrasitler için ise vitrinit yansıma derecesi dikkate alınarak yapılmış bir sınıflamadır.

Alman (Ruhr) sınıflaması: Kömürün uçucu madde oranı ve kekleşme özelliğine dayalı bir sınıflamadır. Esas olarak kömürleşme derecesi yüksek olan kömürler için geçerlidir (Çizelge 2.1).

ASTM sınıflaması: ASTM (American Society for Testing and Materials) tarafından hümik kömürler için yapılmış bir sınıflamadır. Bu sınıflamada kömürün sabit karbon ve uçucu madde yüzdeleri ile kalorifik gücü (üst ısı değeri) ve ayrıca kekleşme özelliği esas alınmıştır. Rankı yüksek olan kömürlerde sabit karbon ve uçucu madde yüzdeleri, rankı düşük olan kömürlerde ise kalorifik güç esas olacak şekilde bir sınıflamaya gidilmiştir.

Çizelge 2.1. Ruhr kömür sınıflaması (Ünalın, 2010)

Kömürün rankı	% Uçucu madde (kuru-külsüz bazda)	Kok özelliği
Gazlı alevli taşkömürü	>35	Sinterleşme
Gazlı taşkömürü	35-30	Kekleşme, çatlaklı
Yağlı taşkömürü	30-20	Kekleşme, çatlaksız
Az yağlı taşkömürü	20-14	Hafif kekleşme ve sinter
Yağsız taşkömürü	14-10	Toz şeklinde
Antrasit	<10	Toz şeklinde

Kömürleşme derecesine göre, kömürleri sınıflandırmak için kullanılan ASTM sınıflandırması Çizelge 2.2’de verilmektedir. Çizelge 2.2’den görüldüğü gibi, bu sınıflamada kömürler; antrasit, bitümlü kömür, alt bitümlü kömür ve linyit olmak üzere 4 sınıfa ve bunlar da kendi içlerinde alt gruplara ayrılmaktadırlar. Bu sınıflamada alt bitümlü kömür ve bitümlü kömür ayırımı, kömürlerin kekleşme özelliklerinden yararlanılarak yapılmaktadır. Kекleşme göstermeyenler alt bitümlü kömür sınıfında, kekleşme gösterenler ise bitümlü kömür sınıfında yer almaktadır (Speight, 2005; Kural, 1998).

Çizelge 2.2. Kömürleşme derecelerine göre ASTM kömür sınıflaması (Speight, 2005)

Sınıf	Gruplar	Sabit C		Uçucu madde		Üst ısıl değer		Kekleşme özelliği
		(%)		(%)		(kcal/kg)		
		(Kuru-külsüz baz)		(Kuru-külsüz baz)		(Havada kuru - külsüz baz)		
		Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	Eşit veya büyük	Daha küçük	
Antrasit	Meta-antrasit	98	-	-	2	-	-	Kekleşmez
	Antrasit	92	98	2	8	-	-	
	Semi-antrasit	86	92	8	14	-	-	
Bitümlü Kömür	Düşük uçuculu	78	86	14	22	-	-	İyi kekleşir
	Orta uçuculu	69	78	22	31	-	-	
	Yüksek uçuculu-A	-	69	31	-	7700	-	
	Yüksek uçuculu-B	-	-	-	-	7150	7700	
	Yüksek uçuculu-C	-	-	-	-	6325	7150	
								Kekleşir
Altbitümlü kömür	Altbitümlü-A	-	-	-	-	5775	6325	Kekleşmez
	Altbitümlü-B	-	-	-	-	5225	5775	
	Altbitümlü-C	-	-	-	-	4565	5225	
Linyit	Linyit-A	-	-	-	-	3465	4565	
	Linyit-B	-	-	-	-	-	3465	

2.4. Kömürlerin Bazı Özellikleri

2.4.1. Rutubet içeriği

Kömür yerindeyken, kuru ve yağlı görünmesine rağmen su ile doymuş bir yapıya sahiptir. Bu rutubet yatak rutubeti olarak adlandırılmaktadır. Rutubet, kömürün yüzeyinde olabildiği gibi, kömür içindeki çatlak ve gözeneklerde de bulunabilmektedir. Kömürlerde rutubet üç şekilde bulunmaktadır (Kural, 1998);

- *Kaba rutubet*: Kömür yüzeyinde tutulan suya “kaba rutubet” veya “yüzey rutubeti” denmekte ve bu rutubet kömür yüzeyindeki boşlukları doldurmaktadır. Kömürün içerdiği kaba rutubet, kömür ağırlığı sabit kalana kadar havayla temasta bırakılarak saptanan ağırlık kaybından hesaplanmaktadır. Kaba rutubeti bu şekilde giderilmiş olan kömür “havada kuru” olarak adlandırılmaktadır.

- *Bünye rutubeti*: Adsorpsiyon ve kapiler kuvvetlerle, yani fiziksel olarak, kömüre bağlı olan su “bünye rutubeti” veya “higroskopik rutubet” olarak adlandırılmaktadır.

- *Molekül suyu*: Kömüre kimyasal olarak bağlı olan su ise “molekül suyu” veya “hidrat suyu” olarak adlandırılmaktadır. Molekül suyunun, kömürün toplam rutubet içindeki payı çok düşüktür.

Kömürdeki nem oranının genellikle mümkün olan en düşük seviyede olması istenmektedir. Çünkü nem, kömürün birim kütlesindeki enerjiyi azaltmaktadır. Ayrıca, kömür yandığı zaman açığa çıkan enerjinin bir kısmı nemin buharlaştırılması için harcanmaktadır. Bu bakımdan, bir yıkama işleminden sonra, kömürdeki yüzey neminin yeterince atılmaması halinde, yıkama yoluyla külü oluşturan maddeler azaltılmış ancak bunların yerine, kendisi de kül kadar istenmeyen nem getirilmiş olmaktadır (Ateşok, 2009a).

Kömürün toplam rutubet içeriği, tüvenan ya da havada kuru numune kullanılarak saptanmaktadır. Tüvenan kömürün toplam rutubet içeriği, önce kaba, sonra bünye rutubetleri saptanarak iki aşamada bulunmaktadır.

2.4.2. Kül içeriği

Kömürün belirli şartlar altında tamamen yanmasından sonra geriye kalan, temelde oksitler ve sülfatlardan oluşan inorganik artığa kül denmektedir. Kömürün yakılmasıyla, kapsadığı organik madde CO_2 , H_2O , SO_x , NO_x gibi gazlara dönüşerek enerji üretilir. Mineral bileşenlerin büyük bir çoğunluğu kömürün yanmasıyla küle dönüşmektedir. Ancak, kömürdeki kül miktarı mineral madde miktarından farklı olmaktadır. Bu farklılığa silikat minerallerinden suyun kaybolması, karbonat minerallerinden karbondioksitin kaybolması, demir piritin demir oksite dönüşmesi neden olmaktadır (Speight, 2005).

Kül yüzdesi bilinen bir kömürün, mineral madde yüzdesi Parr formülü (2,1) ile hesaplanmaktadır.

$$MM = 1,08A + 0,55S$$

(2,1)

MM: Kuru bazdaki kömürün mineral maddesi (%),

A: Kuru bazdaki kömür külü (%),

S: Kuru bazdaki kömürün toplam kükürdü (%).

Külün kökeni kömürün içerdiği mineral maddelerdir. Bu yüzden özellikleri, bu mineral maddelerin bileşimine ve oksidasyonun gerçekleştiği şartlara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Külün büyük bir kısmı kimyasal bileşim olarak silisyum, alüminyum ve demir oksitlerinden ibarettir. Kömürlerde bünye külü ve harici kül olmak üzere iki tür kül bulunmaktadır. Bünye külü, kömürü oluşturan bitkilerden gelen inorganik maddeler olup, kömürdeki toplam külün %2-3'ünü oluşturmaktadırlar. Harici kül ise, kömürü oluşturan bitkilerin dışında kömüre karışan yabancı maddelerdir. Bu maddeler kömüre, kömürleşme sırasında (sinjenetik oluşum) karışabileceği gibi, kömürleşmeden sonra (epijenetik oluşum) da kömür damarları içindeki çatlak ve kırıklar boyunca girebilmektedir. Bu yabancı maddeler kil, şist, kumtaşı, kireçtaşı ve benzerleri olabilmektedir. Bunlar, kömür içinde mikroskopik parçalar halinde bulunabileceği gibi, damarlar ve/veya tabakalar halinde de bulunabilmektedir. Tüvenan kömürdeki yabancı maddeler, üretim esnasında tavan ve taban yataşlarından da karışabilmektedir. Bunların tamamı harici külü oluşturmaktadır. Bünye külü, kömürden yıkama yöntemleriyle uzaklaştırılmazken, harici kül yıkama yöntemleriyle belli bir orana kadar azaltılabilmektedir (Leonard ve Hardinge, 1991).

Kömür külü, kömürün istenmeyen içeriğidir. Kül oranının yükselmesi, değişik kömür kullanım alanlarında, aşağıda verilen olumsuzluklara neden olmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010);

- Kül oranı yükseldikçe, kömür yanıcı madde oranı azalmakta ve buna bağlı olarak, kömür ısı değeri düşmektedir.
- Kül oranı yükseldikçe, kömürün yanması zorlaşmakta ve belirli bir kül oranından sonra tamamen durmaktadır. Çok küllü kömür, termik santrallerde stabil olarak yakılamamakta ve çok küllü iri kömür parçaları yakıldığında, ortada yanmamış kısımlar kalmaktadır.
- Fazla kül, kömür veya kok kullanan reaktörlerin kapasitelerinin düşmesine neden olmaktadır.
- Fazla kül, yüksek fırında spesifik kok tüketimini arttırmaktadır.
- Kömür uzun mesafelere taşındığında, kül de beraber taşınmakta ve nakliye masrafı artmaktadır.

2.4.3. Uçucu madde içeriği

Kömür oksijensiz ortamda yaklaşık 950°C’de ısıtıldığında bünyesinden uzaklaşan, temelde hidrojen, karbonmonoksit, metan gibi yanıcı gazlardan oluşan katran buharları ile karbondioksit ve su buharı gibi yanmayan gazları da içeren maddelere uçucu madde denmektedir. Uçucu madde kömürdeki nemi içermez. Kömürün uçucu madde içeriği, farklı ranklı kömürlerde önemli değişiklikler göstermekte, rank arttıkça karbondioksit ve su buharı gibi yanmayan gazların miktarı da azalmaktadır (Leonard ve Hardinge, 1991).

Uçucu madde oranı, kömürleşme derecesi ile ters orantılı bir bağıntı göstermektedir yani kömürleşme derecesi yükseldikçe, uçucu madde oranı azalmakta ve kömürleşme derecesi düştükçe, uçucu madde oranı yükselmektedir. Uçucu madde oranı en az olan kömür türü antrasittir. Antrasitten, taşkömürü, linyit ve turbalara doğru gidildikçe, kömür uçucu madde oranı artmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010).

2.4.4. Sabit karbon içeriği

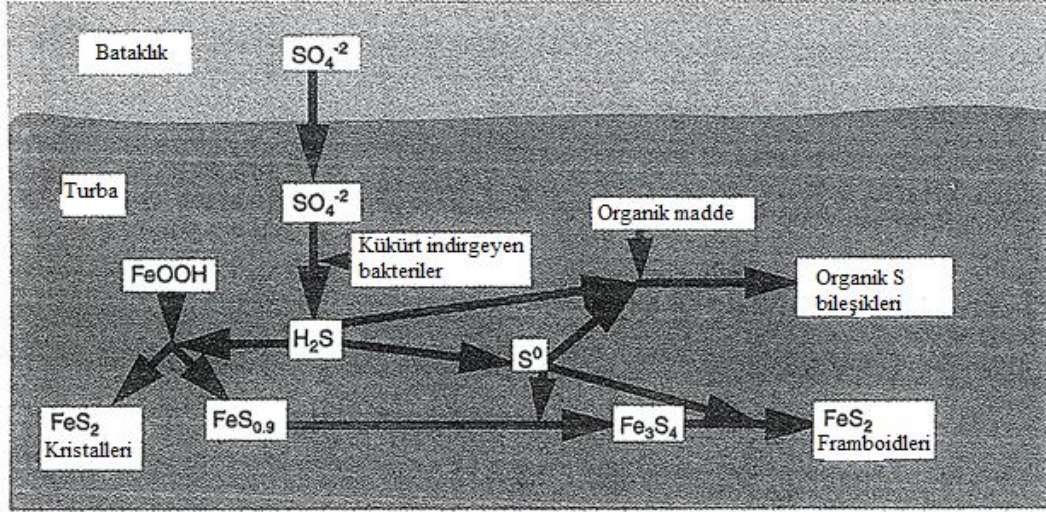
Isıtma yoluyla nemi ve uçucu maddeleri alınmış bir kömürden geri kalan artığın içinde bulunan, katı haldeki yanıcı karbona sabit karbon denmektedir. Bu karbon, beraberinde az da olsa bir miktar N, S, H ve O tutmaktadır. Artığın geri kalanı küldür. Rutubetsiz (kuru) kömürün sabit karbon içeriği; uçucu madde ve kül yüzdelerinin toplamının 100’den çıkarılmasıyla bulunmaktadır (Ünal, 2010).

2.4.5. Kükürt içeriği

Bütün kömürler az miktarda da olsa, kükürt içermektedirler. Kömürlerde kükürt; organik (kimyasal yapıda bulunan), inorganik (mineral kükürt) olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Bunlara ek olarak bazı kömürlerde nadiren de olsa elementel kükürt görülebilmektedir. Organik kükürt, kömürün organik kısmının bir parçası olduğundan, kömürden fiziksel yöntemlerle uzaklaştırılması mümkün olmamaktadır. Kömür içerisinde mineral kükürt olarak, sülfürlü minerallerin en önemlisi pirit (kübik kristalli FeS_2) ve markazit (rombik kristalli FeS_2) iken nadiren galen (PbS), sfalerit (ZnS), kalkopirit (CuFeS_2) halinde, sülfat kükürdü olarak jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ve barit (BaSO_4) mineralleri bulunmaktadır. Kömürlerdeki kükürdün kaynağı Şekil 2.2’de verilmektedir.

Toplam kükürt; kömürü oluşturan orijinal bitki kalıntısındaki organik kükürdün, çökeltme ortamındaki suyun sülfat içeriğinin ve sülfat indirgeyici bakteri etkinliğinin bir fonksiyonudur.

Kömürlerin toplam kükürt yüzdesine göre yapılan sınıflamasına göre; %0,5'den az kükürt içerenler çok düşük kükürtlü kömür, %0,5-1 arasında kükürt içerenler düşük kükürtlü kömür, %1-4 arasında kükürt içerenler oldukça yüksek kükürtlü kömür ve %4'den fazla kükürt içerenler ise çok yüksek kükürtlü kömür olarak kabul edilmektedir (Ünalın, 2010).



Şekil 2.2. Yüksek kükürtlü kömürlerin oluşumu (Kawatra ve Eisele, 2001)

Kömürde kükürt, kömürün çeşitli kullanım alanlarında bazı sorunlar yarattığından önem taşımaktadır. Kükürt, metalürjide kullanılan kokun kalitesini düşürmekte, kazanlarda korozyonu arttırmakta ve %2'den fazla miktarlarda bulunduğu zaman fırınlarda klinker oluşumunu hızlandırmaktadır. Ayrıca, kömür yandığı zaman SO₂ gazı şeklinde atmosfere karışarak, çevre kirlenmesine neden olmaktadır. Koklaşma sırasında kömürdeki kükürdün koka geçiş oranı, kükürt bileşiklerinin cinsine bağlı olarak değişmekle beraber bu oran genellikle 2/3-3/4 arasındadır (Ateşok, 2009a).

2.4.6. Karbon ve hidrojen içeriği

Kömürde kuru-külsüz bazda ağırlıkça, %70-95 C, %2-6 oranında H bulunmakla birlikte, bunlar kömürün en önemli bileşenlerindendir. Kömürdeki karbon ve hidrojenin hemen hepsi kompleks organik bileşikler şeklinde bulunmaktadır. Bununla beraber anorganik yapıda da bulunabilmektedir (Speight, 2005).

2.4.7. Azot içeriği

Kömürdeki azot; bitkisel ve/veya hayvansal proteinler, azotça zengin bakteriler, bitki alkaloidleri ve klorofilden kaynaklanmaktadır. Kömürün içerdiği azotun tamamı organik yapıda olup, büyük kısmı yüksek molekül ağırlıklı heterosiklik bileşikler içinde yer almaktadır. Kömürün

yakıt olarak kullanılması sonucu yayılan azot oksitler, kükürt oksitlerinden sonra kömürden kaynaklanan ikinci önemli hava kirleticidir.

2.4.8. Oksijen içeriği

Kömürün oksijen içeriğinin doğrudan saptanması oldukça zordur, çünkü oksijen kömürün içerdiği minerallerde anorganik bileşikler, organik yapı içinde ise organik bileşikler halinde ve ayrıca rutubet içinde de bulunur. Kömürün oksijen içeriği ASTM D 3176'ya göre aşağıdaki şekilde hesaplanır (2,2). Ancak bu şekilde saptanan yüzde oksijen değerine, formülde kullanılan kül, nem, karbon, hidrojen, azot ve kükürt analiz sonuçlarının içerdiği hataların toplamı doğal olarak yansiyacaktır (Speight, 2005; Kural, 1998).

$$\%O = 100 - (\%K\ddot{u}l + \%Nem + C + H + N + S) \quad (2,2)$$

2.4.9. Isıl değer

Kömür yandığı zaman, içerdiği karbon ve hidrojen bileşiklerinin oksitlenmesi sonucu ısı açığa çıkmaktadır. Katı bir yakıtın ısı değeri, birim ağırlıktaki yakıtın tamamen yanması sonucu açığa çıkan ısı biriminin sayısıdır. Bir kömürün ısı değeri, türüne ve organik yapısına karışmış olan yanmayan maddelerin miktarına bağlı olmaktadır.

Kömürün ısı değerinin kalorimetre ile tayini, kömürün bir bomba içinde, basınç altında oksijen ile sabit hacimde yakılması ve oluşan ısıнын ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Kalorimetre bombasında yanma sırasında nem önce buharlaşmakta, sonra da sıvı su halinde yoğunlaşmakta ve yoğunlaşma ısını vermektedir. Bu nedenlerle, kalorimetre bombasında yakma yöntemi ile saptanan yanma ısısı üst ısı değeri ifade etmektedir.

Alt ısı değeri ise, tüm suyun yoğunlaşma ısının üst ısı değerden çıkarılması yoluyla bulunmaktadır (Speight, 2005; Kural, 1998; Leonard ve Hardinge, 1991). Alt ısı değeri ile üst ısı değeri arasındaki ilişki eşitlik (2,3)'de verilmektedir (Kemal ve Arslan, 2010).

$$H_a = H_{\ddot{u}} - 5,97(9H + W) \quad (2,3)$$

H_a : Alt ısı değeri (kcal/kg),

$H_{\ddot{u}}$: Üst ısı değeri (kcal/kg),

$9H$: Yanma esnasında oluşan su miktarı,

W : Yakıt nem oranı (%).

Kömür ısı değeri, kömür türü yanında, kömür kül ve nem oranı tarafından tayin edilmektedir. Kül, kömür yanıcı madde miktarını düşürdüğünden; nem ise, hem yanıcı madde

miktarını düşürmesi hem de buharlaşma ısısı kaybından dolayı, kömür ısıl değerini düşürmektedir. Kül ve nem oranları ile kömürün ısıl değeri arasındaki ilişki (2,4)'de verilmiştir (Kemal ve Arslan, 2010).

$$H_{ax} = \frac{(100 - K_x - W_x)}{100} H_{as} - 5,95W_x \quad (2,4)$$

H_{ax} : Herhangi bir bazda kül ve nem oranına sahip kömürün alt ısıl değeri (kcal/kg),

H_{as} : Saf kömürün alt ısıl değeri (kcal/kg),

K_x : Herhangi bir bazdaki kül içeriği (%),

W_x : Herhangi bir bazdaki nem içeriği (%).

Kömürün kısa analizinden yola çıkılarak, diğer baz (orijinal, kuru ve kuru-külsüz baz) hesaplamaları yapılabilmektedir. Tez kapsamında çalışılan linyitlerin baz hesaplamalarında kullanılan ilişkiler EK 1'de verilmektedir.

2.4.10. Kömürlerdeki mineral madde içeriği

Mineral madde, kömürün organik yapısının parçası olmayan elementlerin toplamı olmaktadır. Organometalik bileşikler gibi, inorganik elementlerin organik yapı ile oluşturdıkları bileşikler de mineral maddeyi oluşturmaktadırlar (Kural, 1998).

Kömürün mineral bileşenleri kökenlerine göre 3 grupta toplanmaktadır (Ünalan, 2010);

1. Turbanın çökeldiği ortama dışarıdan su ve/veya rüzgar aracılığı ile ya da volkanik etkinlik sırasında gelen ve organik madde ile birlikte depolanan kırıntılar. Bunlara detritik mineraller denmektedir. Örneğin; kuvars, feldispat, kil, volkan külleri vb.
2. Su ortamında yaşayan organizmalara ait olup daha sonra turbaya karışan mineral maddeler veya bunların parçaları. Örneğin; midye kabukları (CaCO_3), diatomlar (SiO_2), sünger spikülleri (SiO_2) vb.
3. Ortamdaki su içinde eriyik halde bulunan mineral maddenin kristallenerek çökmesi sonucu ortaya çıkan mineraller. Bu tür minerallere, yerinde oluşan mineral anlamına gelen otijenik mineraller denmektedir. Örneğin; pirit, siderit, markazit, kalsit, dolomit, ankerit, apatit, illit vb.

Kömürün içerdği mineral maddelerin %95'inden fazlasını majör bileşenler oluşturmaktadır. Majör bileşenler 4 gruba ayrılmaktadır (Kural, 1998);

Killi mineraller: İllit, kaolinit, montmorillonit ve illit-montmorillonitlerin karışımı olarak ortaya çıkan alüminosilikatlardır. Toplam mineral maddenin %50'sini oluştururlar. Kömür damarlarına, genellikle tonştayn adı verilen kaolinitçe zengin killer eşlik etmektedir.

Karbonat mineralleri: Kalsit, siderit, dolomit ve ankeritin yanı sıra kalsiyum, demir, magnezyum ve manganın çeşitli kompleks ve karbonatları da kömürün içerdği majör bileşenlerdendir.

Kükürtlü mineraller: Genellikle FeS_2 'nin iki kristal şekli olan pirit ve markazit, kükürtlü mineralleri oluşturmaktadır.

Silikat mineralleri: Büyük miktarı kuvars şeklinde ortaya çıkmakta ve toplam mineral maddenin %15-20'sini oluşturmaktadır.

Kömürlerde bulunan bazı mineral maddeler Çizelge 2.3'de verilmektedir.

2.4.11. Kömürün iz element içeriği

Kömür içinde bulunan iz elementlerin temel kaynağı, kömürü oluşturan bitkiler ve çürüme esnasında ve sonrasında organik maddeyle beraber bu elementlerin kombinasyon yaparak zenginleşmeleridir. Çökelme ortamına ait sudan, ya da havzaya dışarıdan taşınan kırıntılardan kaynaklanmaktadır (Leonard ve Hardinge, 1991).

Kömürlerde, tenörleri ppm (milyonda bir) olarak ifade edilen 60'tan fazla iz element bulunabilmektedir. Bunlardan bazıları; Ag, Au, As, B, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Hg, La, Li, Mn, Mo, Ni, Sb, Se, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zn ve Zr'dir. Bu elementler kömüre ait maserallere veya minerallere (kil, karbonat, sülfid vb.) bağlı olarak bulunmaktadır (Ünalan, 2010).

Çizelge 2.3. Kömürlerdeki bazı mineraller

Silikat mineralleri	Kuvars (trigonal), SiO_2 Klorit, $(\text{Mg,Al,Fe})_{12} [(\text{Si,Al})_8 \text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$ Serpantin, $\text{Mg}_3 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_4$
Kil mineralleri	Kaolinit grubu, $\text{Al}_4 [\text{Si}_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_8$ İllit grubu, $\text{K}_{1-1.5} \text{Al}_4 [\text{Si}_{7-6.5} \text{Al}_{1-1.5} \text{O}_{20}] (\text{OH})_4$ Montmorillonit grubu, $(1/2 \text{ Ca,Na})_{0.7} (\text{Al,Mg,Fe})_4 [(\text{Si,Al})_8 \text{O}_{20}] (\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Feldispat grubu	Alkali feldispatlar, $(\text{K,Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ Plajiolklas, $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$
Sülfatlar	Jips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Anhidrit, CaSO_4 Hemihidrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ (Bassanit) Barit, BaSO_4
Sülfidler	Pirit (kübik), FeS_2 Markazit (ortorombik), FeS_2 Pirotit, FeS Kalkopirit, CuFeS_2 Sfalerit, ZnS
Karbonatlar	Ankerit, $\text{Ca}(\text{Mg,Fe}^{2+},\text{Mn}) (\text{CO}_3)_2$ Kalsit (trigonal), CaCO_3 Aragonit (ortorombik), CaCO_3 Magnezit, MgCO_3 Radokrozit, MnCO_3 Siderit, FeCO_3 Dolomit, $\text{Ca,Mg} (\text{CO}_3)_2$ Strontianit, SrCO_3 Nitherit, BaCO_3 Rutil, TiO_2

2.5. Kömürlerin Petrografik Özellikleri

Kömür oldukça heterojen ve kompleks bir yapıya sahip olduğu için, kömürün fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek oldukça zor olmaktadır. Bunun için yapılması gereken bu kompleks yapıyı en aza indirmektedir. Kömürden maserallerinin ayrılması bu kompleks yapıyı azaltmanın yollarından biri olmaktadır. Maseraller mikroskopik olarak tanımlanan kömürün

organik bileşenleridir ve fiziksel ve kimyasal özelliklerinde farklılıklar bulunmaktadır (Gupta, 2007).

İnorganik kayalar nasıl minerallerden oluşmuşsa, kömürler de maserallerden meydana gelmektedir. Maseraller biçim ve yapıları ile kömürleşme süresinde korunmuş olan karbonlaşmış bitki kalıntılarıdır. Mineraller ve maseraller arasında belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Mineraller kristal yapıda olup, kimyasal bileşimleri belirlidir. Maserallerin kimyasal yapıları ve fiziksel özellikleri büyük değişiklikler göstermektedir. Aynı zamanda, maseraller bir kristal yapıya da sahip değildirler. Maseralleri çıplak gözle görmek olanaksızdır, fakat mikroskop yardımıyla ayrıntılı olarak incelenebilmektedirler (Köksoy, 1985).

Bitki kalıntılarından maserallerin oluşumu; bitki topluluğunun türüne, iklimsel, ekolojik koşullara ve çökelme şartları gibi etkenlere bağlı olmaktadır (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008). Mikroskopta değişik maseralleri ayırt edebilmek için renk, ışığı yansıtma, şekil ve rölyef gibi bazı parametrelerden yararlanılmaktadır. Kömür maseralleri bu özelliklerine göre; vitrinit, eksinit (liptinit) ve inertinit olarak üç ana gruba ayrılmaktadırlar (Köksoy, 1985). Litotip terimi makroskopik gözlemler için, mikrolitotip veya maseral terimi ise mikroskopik gözlemler için kullanılmaktadır (Kural, 1994).

2.5.1. Kömürün makroskopik bileşenleri

Turba incelendiğinde, piteral ismi verilen bitkisel kısımlar görülebilmektedir. Linyit ve bitümlü kömürlerde, kolayca izlenebilir bantlar bulunmaktadır. Bu bantlar, parlaklık, renk ve şekil gibi bazı fiziksel özellikleriyle ayırt edilebilmektedir. Stopes (1935), bu görülebilir bantları litotipler olarak adlandırmıştır. Litotipler çoğunlukla bitümlü kömürlerde bulunmaktadır. Stopes'a göre bitümlü kömürlerde; vitren, klaren, düren ve fügen olmak üzere dört farklı litotip bulunmaktadır (Thomas, 2013; Ünal, 2010; Kural, 1994). Çizelge 2.4'de kömürlerdeki litotipler ve özellikleri görülmektedir.

- *Vitren*: Siyah renkli, parlak ve camsı olup taşkömürlerinde en çok rastlanan litotiptir. Parlak kömür olarak da adlandırılmaktadır. 3-10 mm kalınlığı olan ince bantlar veya mercekler şeklinde bulunmaktadır. Esas olarak vitrinit maserallerinden oluşmaktadır. Çok kırılkan ve konkoidal kırıklıdır. Homojen bir içyapıya sahiptir.

-*Klaren*: Yarı parlak bir litotiptir. Kalınlığı 1 mm'den ince, katmanlanmaya paralel, parlak ve mat laminaların ardalanması şeklindedir. Parlak laminalar vitrinit maserallerinden, mat laminalar ise liptinit ve inertinit maserallerinden oluşmaktadır. Vitren ve düren arasında bir görünüme sahiptir.

-*Düren*: Mat kömür olarak da adlandırılmaktadır. Mat siyah, koyu gri renkli bantlar şeklindedir. Esas olarak liptinit ve inertinit maserallerinden oluşmaktadır. Diğer litotiplere göre daha sert olup daha fazla mineral madde içermektedir. Küp ya da dikdörtgen prizma oluşturacak şekilde

kırılmaktadır. 3 mm'den kalın bantlar şeklinde bulunmaktadır. Bu litotipler bataklık ortamda, su tablasının altında oluşmaktadır. Parlak kömürlerde, litotip olarak daha çok vitren ve klaren bulunurken, mat kömürlerde ise düren yaygındır.

-Füsen: Odun kömürüne benzemektedir. Mat siyah-gri renkli, gözenekli, yumuşak ve kolay ufalanabilen bir litotiptir. Elle ufalandığında tozlaşmakta ve parmakları boyamaktadır. Ana maseral olarak inertinit grubuna dahil olan füsinit ve semifüsinit maserallerini kapsamaktadır. Kömür içinde ender olarak rastlanmaktadır. Kalınlığı birkaç mm'yi aşmayan ince merccekler oluşturmaktadır. Gözenekleri boş veya bazı hallerde pirit, kalsit vb. ile dolu olabilmektedir. Taşkömüründe çok az bulunan bir litotiptir.

Çizelge 2.4. Kömürlerdeki litotipler ve özellikleri (Ocakoglu, 2015)

Ayırt edici özellikler					
Litotip	Tabaka	Yarılabilme	Kırılma şekli	Görünüm	Diğer özellikler
Vitren	Zayıf	İyi	Küp şeklinde, kısmen konkoidal	Çok parlak-parlak	Tabakalanma yönüne dik çok sayıda çatlakları bulunur.
Düren	Zayıf	Kötü	Düzensiz	Mat	Bantların yüzeyleri pürüzlü, genellikle gri ve siyah görünümlüdür.
Füsen	Bantsız	Yok	Düzensiz	Mat-ipeğimsi	İpeğimsi, lifsi dokuya sahip, yüksek oranda mineral içeren, eli boyayan tek litotiptir.
Klaren	İyi	Orta	Vitren ve düren arasında değişir.		Vitren, düren ve/veya füsünün ince bantlarının ardalanması ile oluşur.

2.5.2. Kömürün mikroskopik bileşenleri

Kömürler dış görünüşleri, parlaklıkları, yoğunlukları ve diğer bazı özellikleri birbirinden farklı, mikroskopik ve/veya makroskopik olarak tanımlanabilen, maseral adı verilen bir takım yapı maddelerinden oluşmaktadır. Bu yapı maddeleri vitrinit, eksinit (liptinit) ve inertinit olmak üzere üç ana maseral kümesinde toplanmaktadır. Üç maseral kümesi, farklı bileşimde olduklarından ışığı yansıtma özellikleri ile birbirlerinden ayrılmakta olup, biçimlerine göre bölümlenmiş basit maseralleri içermektedirler. Değişik maseral kümelerinin bir araya gelmesinden de mikrolitotipler oluşmaktadır. Maseraller, maseral kümeleri ve mikrolitotipler, kömürlerin mikroskopik yapıcılarıdır (Kural, 1998).

-Vitrinit (Hüminit) grubu maseraller:

Koklaşma özelliği ve metalürjik kok üretimi açısından çok önemli bir maseral grubudur. Vitrinitin özellikleri, kömürleşme derecesi ile değişmektedir. Kömürleşme derecesi arttıkça, yansıyan ışıktaki rengi siyahımsı griden beyaza kadar değişmektedir. Bitki hücre duvarlarının lignin, tannin ve selülozlarından, hümitik asit etkisi ile çekirdekdeki -OH, -COOH, -OCH₃ gibi grupların ayrılması ile oluşmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010). Aynı zamanda protein ve lipidler de vitrinit maserallerinin oluşumunda önemli rol oynamaktadırlar. Bu durum vitrinit maserallerinde optik özelliklerin düzenli değişimine neden olduğundan, kömürleşme derecelerinin saptanmasında vitrinit yansıtma değerlerinin ölçümü kullanılmaktadır. Vitrinit maseralleri aromatik yapı göstermektedirler (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008). Vitrinitler, %77-96 C, %1-6 H, %1-16 O içermektedirler. Uçucu madde içerikleri %2-45, yoğunlukları ise 1,3-1,8 g/cm³ arasında değişmektedir. Kuru-külsüz kömürde uçucu madde oranı %19-33 arasında olan vitrinitler, 350-500°C'ler arasında plastikleşerek kömüre koklaşma özelliği kazandırmaktadır. Bu değerlerden daha fazla veya daha az uçucu madde içeren vitrinitler plastikleşme, yani koklaşma özelliğini kaybetmektedir (Kemal ve Arslan, 2010).

Aynı ranklı kömürlerde, lipnit ve inertinitle karşılaştırıldığında vitrinitler, orta derecede yansıtma özelliklerine sahiptirler (Kural, 1998). Kömür maseral bileşiminin yarıdan fazlasını bu gruba ait maseraller oluşturduğundan, kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri, büyük oranda bu maseral grubu tarafından tayin edilmektedir (Kemal ve Arslan, 2010).

-İnertinit grubu maseraller:

İnertinit grubu maseraller; bitki kalıntılarının daha birikmeden turba aşamasında redoks, biyokimyasal ve kimyasal prosesler vasıtasıyla oksidize şartlarda güçlü bir şekilde bozunması sonucu oluşmaktadır. İnertinit maseralleri yüksek derecede aromatiklik gösterirler (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008). Bu grubun maseralleri hidrojen fakir, karbonca zengin olduklarından koklaşma sürecinde tepkime göstermemektedirler. Büyük bir kısmı belirgin hücre yapısı göstermektedir. Vitrinit gibi bitki hücre duvarlarının linyin ve selülozlarından, mantarlardan türerler fakat oluşum süreçleri değişiktir. Çökelmeden önce oksitlenme ve parçalanma olmaktadır. Daha önce kömürleştiklerinden, esas kömürleşme sürecinde oksijen ve hidrojen kaybederek karbonca zenginleşmekte ve böylece yansıtma dereceleri yükselmektedir (Kural, 1998). Yansıyan ışıktaki gri-grimsi, sarımsı ve beyaz renkte olup, üç maseral grubu arasında en yüksek yansıtmaya sahip olanıdır (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008).

İnertinit grubundaki maseraller, ısıtıldıklarında herhangi bir yumuşama ve plastikleşme göstermemekte, sadece termik parçalanmaya uğrayarak gaz ve sıvı ürünler vermektedirler. Geride kalan kok ise toz halinde olmaktadır. Bir kömürün sağlam parçalar halinde kok

verebilmesi için, inertinit grubu maserallerin de, vitrinit ve eksinit grubu maseraller tarafından bağlanmaları, yani birbirlerine yapıştırılmaları gerekmektedir (Kemal ve Arslan, 2010).

İnertinitler, diğer iki grup maseralle karşılaştırıldığında, kimyasal olarak inert kabul edilmektedirler. Sadece mikrinit inert olmamakla birlikte, semifüsinit de tamamen inert değildir (Kural, 1998).

-Eksinit (Liptinit) grubu maseraller:

Eksinit grubu maseraller bitkilerin spor, kütikül, süberin, hücre duvarı, reçine ve polimerize vaks, katı yağlar ve bitkisel yağlar gibi kısımlarının bozunması sonucu oluşmaktadırlar. Bu maseral grubu diğer maserallere göre daha yüksek hidrojen içeriğine sahiptir ve temelde alifatik yapıli bileşiklerden oluşmaktadır (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008). Kömürlerde genellikle %5-10 arasında bulunmaktadır. Isıtıldıklarında vitrinitlere göre daha akışkan bir kütle oluşturmaktadırlar. Yüksek uçucu madde içerikleri dolayısıyla, kok verimleri vitrinitlerden azdır (Kemal ve Arslan, 2010). Yansıtma derecesi en düşük olan gruptur. Yansıyan ışıktaki, kömürleşme derecesi artışına göre sarı-kahverengi-siyah renkler göstermektedirler (Kural, 1994).

Eksinit grubuna giren maseraller de, koklaştırmada aktif rol oynamaktadırlar. Ancak, kömür maseral bileşiminin az bir kısmını oluşturdıkları ve kok verimlerinin düşük olması dolayısıyla kok üretmek için kömür seçiminde, vitrinitin gölgesinde kalmaktadırlar (Kemal ve Arslan, 2010). Rank derecelerine bağlı olarak liptinitler, karbonizasyon boyunca kömürün akışkanlığını korumasına yardımcı olmaktadır (Kural, 1994).

Eksinit maseralleri yüksek hidrojen içeriklerinden dolayı, karbonizasyon boyunca yüksek oranda katran ve gaz ürünlerin oluşumuna yol açmaktadırlar. Liptinit grubunun maseralleri aynı zamanda yüksek kalorifik değere sahiptirler. Bu maserallerin oksidasyon hassasiyetleri düşük, hidrojenasyon kapasiteleri ise mükemmeldir (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008). Kömürlerdeki mikrolitotipler Çizelge 2.5’de görülmektedir.

Çizelge 2.5. Sert kömürlerdeki mikrolitotipler (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008)

Mikrolitotip	Maseral bileşimi	Grup
Vitrit	Vitrinit (V) > %95	Monomaseralik
Liptit	Liptinit (L) > %95	
İnertit	İnertinit (I) > %95	
Klarit	V+L > %95	Bimaseralik
Durit	I+L > %95	
Vitrinertit	V+I > %95	
Duroklarit	V > L,I (her biri >%5)	Trimaseralik
Vitrinertoliptit	L > V,I (her biri >%5)	
Klarodurit	I > V,L (her biri >%5)	
Karbarjilit	Kömür + hacimce %20-60 kil	Karbominerit
Karbopirit	Kömür + hacimce %5-20 sülfür	
Karbankerit	Kömür + hacimce %20-60 karbonat	
Karbosilikat	Kömür + hacimce %20-60 kuvars	
Karbopoliminerit	Kömür + hacimce %20-60 çeşitli mineraller (%5'den yüksek pirit içeriği)	

2.6. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler

2.6.1 Yüzdürme-batırma

Yüzdürme-batırma testleri, yoğunlukları belirli değerlerde olan durgun sıvı ortamlarda yapılmaktadır. Yoğunlukları ayarlanabilir olan bu ortamları 3 grupta toplamak mümkündür.

- Organik sıvıların alkol veya benzen ile karışımları
- İnorganik tuzların sudaki çözeltileri
- İnce öğütülmüş katı maddelerin sudaki süspansiyonları

Bu ağır ortamlardan organik sıvılar ve inorganik tuzların sudaki çözeltileri laboratuvar çapında yapılan yüzdürme-batırma testlerinde kullanılırken, katı madde süspansiyonları endüstriyel çaptaki yıkama ünitelerinde kullanılmaktadır.

Yüzdürme-batırma testleriyle, kömürün hangi yoğunlukta külünden ayrılabilceği, ayırma işlemi sonucunda elde edilecek yüzen (temiz kömür) kısmın miktarının belirlenmesi ve kül oranının tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca yüzdürme-batırma testleri sonuçlarının irdelenmesiyle kömürün kolay veya zor yıkanabileceği hakkında bilgi edinilmektedir.

Yüzdürme-batırma testleri için seçilen yoğunluklar genellikle 1,3 g/cm³ den başlayarak 0,1 g/cm³ artışlarla 2,0 g/cm³ e kadar ayarlanabilirler. Saf kömürün yoğunluğu 1,17-1,35 g/cm³, kül oluşturan minerallerin yoğunluğu ise 1,8 (şeyl)-5,2 (galen) g/cm³ aralığında olduğundan, kömür yıkamada kullanılacak ZnCl₂ çözeltileri 1,3 g/cm³ ile 1,8 g/cm³ aralığında hazırlanmaktadır (Drzymala, 2007).

Yüzdürme-batırma testlerine tabi tutulacak kömür numunesi özelliklerine, miktarına ve tane iriliğine göre farklı (örneğin 1,3-1,4-1,5-1,6-1,7 ve 1,8 g/cm³) yoğunluklarda hazırlanan ZnCl₂ çözeltileri genellikle 30 lt hacmindeki kovalara konur. Numune önce suyla iyice yıkanır ve süzülür.

Yüzdürme-batırma deneyine tabi tutulacak numune suyla yıkandıktan sonra, ilk önce 1,3 g/cm³'lük ZnCl₂ çözeltisine atılarak karıştırılır ve yüzen kısım 0,5 mm açıklıklı bir süzgeç vasıtasıyla alınarak, 1,3 g/cm³ de yüzen olarak adlandırılır. Daha sonra batan kısım 1,4 g/cm³ yoğunluklu çözeltiye atılır ve karıştırıldıktan sonra, yine süzgeçle yüzen malzeme alınarak +1,3-1,4 g/cm³ yoğunluklu malzeme olarak isimlendirilir. Aynı işlem daha yüksek yoğunluklu çözeltilerde de tekrar edilir ve en son olarak 1,8 g/cm³'te batan malzeme alınarak +1,8 g/cm³ olarak isimlendirilir. Elde edilen yoğunluk fraksiyonlarındaki ürünler yıkanarak ZnCl₂'den arındırıldıktan sonra, kurutulup tartılır ve numunenin tamamı öğütüldükten sonra kül analizleri gerçekleştirilir. Ağırlık ve kül analizleri değerleriyle, yüzdürme-batırma değerlendirme çizelgesi oluşturulur. Bu çizelge yardımıyla kömür yıkanabilirliğini gösteren eğriler elde edilir. Bu eğriler yardımı ile belirli kül oranında konsantr elde etmek istendiğinde verimin nasıl olacağı ve artıktaki kalan kısmın kül miktarı bulunur. Yoğunluk eğrisi yardımıyla, belirli küllü temiz kömür elde etmek için, kömürün hangi ayırma yoğunluğunda yüzdürülmesi gerektiği ortaya çıkar. Genel olarak eğrinin yatay ve dikey kısmı arasındaki açı dikleştikçe kömürün yıkanabilme özelliğinin arttığı söylenebilir (Drzymala, 2007; Yıldız, 2014).

Son yıllarda yüzdürme-batırma testlerinden yıkanabilirliğin daha iyi anlaşılması amacıyla yeni indeksler geliştirilmiştir. Bunlar kısaca aşağıda açıklanmıştır;

- Optimum yıkanabilirlik derecesi (N) ve yıkanabilirlik sayısı (W),
- Yıkanabilirlik (IW) indeksi,
- Yakın yoğunlukta malzeme (NGMI) indeksi,

2.6.1.1. Optimum yıkanabilirlik derecesi (N) ve yıkanabilirlik sayısı (W)

Yıkanabilirliğin; tane boyutu, kül, yüzen ve batan ürünlerin miktarları, birbirine yakın yoğunlukta malzeme miktarı gibi birçok parametreye bağlı olduğu bilinmektedir. Bunlara ek olarak literatürde, optimum yıkanabilirlik derecesi (degree of washing, N) ve yıkanabilirlik sayısı (washability number, W) gibi parametrelerin yıkanabilirliğin yorumlanması açısından kullanımının faydalı olduğu bildirilmektedir. Yıkanabilirlik derecesi (degree of washing, N) ve

yıkanabilirlik sayısı (washability number, W) (2,5) ve (2,6)'daki eşitliklerden hesaplanmaktadır (Holuszko ve Grieve, 1990).

Yıkanabilirlik Derecesi (N);

$$N = \frac{w(a-b)}{a} \quad (2,5)$$

Burada:

a: Ham (beslenen) kömürün külü (%),

b: Verilen herhangi bir yoğunlukta temiz kömürün (lavenin) külü (%),

w: Verilen herhangi bir yoğunlukta temiz kömürün (lavenin) yüzen miktarı (%).

Yıkanabilirlik derecesi, aynı zamanda kömür ile beraber bulunan mineral maddelerin jeolojik depolanma şartlarını da belirler. Sakin ortamlarda oluşan kömür damarları daha az mineral madde içerdikleri için bu kömürlerin yıkanabilirlik derecesi, hareketli ortamlarda oluşmuş olan kömür damarlarına göre daha yüksektir (Nasir vd., 2012).

Yıkanabilirlik sayısı, optimum yıkanabilirlik derecesinden direkt olarak (2,6)'daki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$W = \frac{10(N_{opt})}{b_{opt}} \quad (2,6)$$

N_{opt} : Optimum yıkanabilme derecesi (Yıkanabilirlik derecesine karşı, ayırma yoğunluğuna göre çizilen eğrinin maksimum değeri),

b_{opt} : Optimum yıkanabilme derecesindeki kül içeriği (%).

Yıkanabilirlik sayısı, optimum seviyede yıkanabilirlik derecesinin temiz kömür külüne oranı olarak tanımlanmaktadır (Nasir vd., 2012). Yıkanabilirlik sayısı 0 ile 100 arasında bir değer olup, sayı arttıkça kömürün yıkanabilirliği daha kolay olmaktadır (Abakay Temel vd., 2015). Yıkanabilirlik sayısı, herhangi bir tüvenan kömürün yıkama öncesinde kırılması gerekli üst tane boyutunun ve yıkama prosesinin seçiminde yardımcı olabilmektedir. Şüphesiz tüvenan kömürün yıkama öncesinde kırılması gerekli üst tane boyutunun ve yıkanmış ürünlerin içermesi gerekli kül miktarının belirlenmesinde piyasa koşulları önemli olmasına rağmen, lavvarın tasarımında piyasa koşullarından çok kömürün yıkanabilme özelliğinin önemli olduğu durumlarda yıkanabilirlik sayısı kullanılmalıdır. Yıkanabilirlik sayısına göre üst tane boyutu ve yıkama prosesi seçimi Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Yıkanabilirlik sayısına göre üst tane boyutu ve yıkama prosesi seçimi (Ünlü, 1990)

No	Yıkanabilirlik sayısı aralığı (W)	Üst tane boyutu	Yıkama yöntemi
1	50 ve daha yukarısı	250-75 mm arasında herhangi bir tane boyutu	+0,5 mm kömür için Baum jigi, +5 mm kömür için ağır-ortam tamburu, -5 mm için Sallantılı masa
2	20-49 arası	150-50 mm arasında herhangi bir tane boyutu	+15 mm kömür için ağır-ortam tamburu, -15 mm kömür için Feldspat jigi, 15-0,5 mm kömür için ağır-ortam siklonu,
3	10-19 arası	30-15 mm arasında herhangi bir tane boyutu	+0,5 mm kömür için ağır-ortam siklonu veya eşdeğer ayırma cihazı
4	9 ve daha aşağısı	10 mm veya daha küçük	+0,5 mm kömür için ağır-ortam siklonu veya eşdeğer ayırma cihazı

2.6.1.2. Yıkanabilirlik indeksi (GWI/IW)

Govindarajan ve Rao (1994) tarafından önerilen kömürün yıkanabilirliğinin nicel kriteri, Govindarajan yıkanabilirlik indeksi (GWI) olarak da ifade edilen, 0 ile 100 arasında değişen bir değere sahiptir. GWI'nın bu değerleri 0'dan 100'e doğru zor yıkanabilen (yıkamayan) kömürden kolay yıkanabilen kömüre doğru artmaktadır. Kömürün yıkanabilirliği için Govindarajan indeksi (2,7)'de verildiği gibi geliştirilmiştir (Majumder ve Barnwal, 2004; Mir, 2014).

$$GWI (IW) = (ERNM \times DRNA) \times 100 \quad (2,7)$$

ERNM= Külsüz malzemenin kazanım verimi (%),

DRNA= Küllü ve külsüz malzemenin kazanım verimleri arasındaki fark (%).

Govindarajan ve Rao (1994) verilen bir kömürün yüzdürme-batırma verilerinden, beslenen kömürün yüzeninin kümülatif fraksiyon ağırlığının bir fonksiyonu olarak külsüz (R_N) ve küllü (R_A) yapıdaki malzemenin verim eğrilerinin çizilebildiğini göstermiştir. Kangal linyiti örnek alınarak Şekil 2.3 çizilmiştir. Yüzdürme-batırma analizinin yüzen kısmında külsüz ve küllü yapıdaki malzemenin verimlerinden, yıkamanın kolaylığı veya zorluğu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Buna göre aşağıdaki iki denklem kullanılarak verilen bir kömürün yüzdürme-batırma analizinden verim eğrileri çizilebilmektedir.

$$R_N = \frac{100X(100-C_A)}{100-H_A} \quad (2,8)$$

$$R_A = \frac{100XC_A}{H_A} \quad (2,9)$$

Burada;

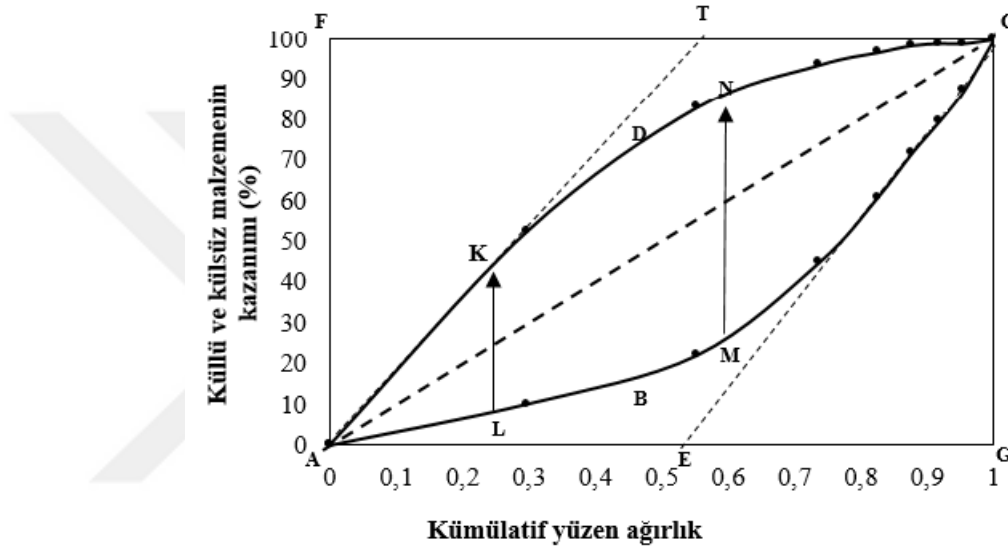
R_N : Külsüz malzemenin verimi (%),

R_A : Küllü malzemenin verimi (%),

X : Beslenen kömüründe yüzen kısmın kümülatif miktarı (%),

C_A : Yüzen kısmın kül yüzdesi (%),

H_A : Beslemedeki kül yüzdesi (%).



Şekil 2.3. Kangal linyiti için küllü ve külsüz malzemenin kazanım eğrileri

Şekil 2.3’de ADC ve ABC eğrileri sırasıyla külsüz ve küllü yapıdaki malzemenin verimini göstermektedir. AT ve EC’nin düz çizgileri “kolay yıkanabilen” kömürler için külsüz ve küllü malzemenin verim grafiğini göstermektedir. Şekil 2.3’de AE ve FT ile EG ve TC uzunluğu birbirine eşittir ve sırasıyla beslemedeki külsüz ve küllü kısmın ağırlığını göstermektedir. FAG açısının açılırtayı olan AC çizgisi zor yıkanabilirliği (yıkanamazlık) göstermektedir (Dehghan ve Aghaei, 2013).

Eşitlik (2,7)’deki ERNM ve DRNA aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$ERNM = \frac{\text{ADC eğrisi ve AC çizgisi arasındaki alan}}{\text{ATC üçgeninin alanı}} \quad (2,10)$$

$$DRNA = \frac{ADC \text{ ve } ABC \text{ eğrileri arasındaki alan}}{ATCE \text{ dörtgeninin alanı}} \quad (2,11)$$

Külsüz (R_N) ve küllü (R_A) malzeme veriminin eğrileri sınır şartlara sahiptir ve herhangi bir denklemle tanımlanabilen bu eğriler, ERNM ve DRNA değerlerini bulmaya yardımcı olmaktadır.

X'in tüm değerleri için külsüz verim malzeme eğrisi (R_N) AT'nin kolay yıkanabilen çizgisinin altında ve yıkanamayan AC çizgisinin üzerinde olmalıdır. Benzer şekilde küllü malzeme verimi (R_A) de AC ve CE eğrileri arasında olmalıdır. R_A ve R_N yükselen eğriler olup, aşağıda verilen kübik eşitliklerle yakın ilişkilidir;

$$R_N = aX + bX^2 + cX^3 \quad (2,12)$$

$$R_A = pX + qX^2 + rX^3 \quad (2,13)$$

Burada a, b, c, p, q ve r sabit değerler olup, kazanım eğrilerinden en küçük kareler metodu kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$ERNM = \frac{6a + 4b + 3c - 600}{600H_A} \quad (2,14)$$

$$DRNA = \frac{[6(a - p) + 4(b - q) + 3(c - r)]}{600} \quad (2,15)$$

Yıkanabilirlik indeksi (GWI):

$$GWI = \frac{[6a + 4b + 3c - 600][6(a - p) + 4(b - q) + 3(c - r)]}{3600H_A} \times 100 \quad (2,16)$$

2.6.1.3. Yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI)

Belirli bir yoğunlukta tipik bir kömürde yıkamanın zorluk derecesi, $\pm 0,1$ yoğunlukta malzeme miktarına bağlıdır. Bu belirli bir ayırma yoğunluğunda yakın yoğunlukta malzeme (NGM) olarak bilinmektedir. NGMI değeri, 0 ile 1 arasında değişen bir değere sahiptir. NGMI'nın bu değerleri 0'dan 1'e doğru kolay yıkanabilen kömürden zor yıkanabilen (yıkanmayan) kömüre doğru artmaktadır. Şekil 2.3'e göre NGMI aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Sekhar vd., 2007; Mohanta vd., 2016; Ayhan ve Abakay Temel, 2008):

$$NGMI = \frac{KLMN \text{ alanı}}{ABC \text{ ve } ADC \text{ eğrileri arasındaki alan}} \quad (2,17)$$

Eşitlik (2,12) ve (2,13)'ün integrali alınarak, Şekil 2.3'deki ABC ve ADC eğrileri arasındaki alan aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$= \int_0^1 (aX + bX^2 + cX^3) dX - \int_0^1 (pX + qX^2 + rX^3) dx \quad (2,18a)$$

$$= \{6(a - p) + 4(b - q) + 3(c - r)\}/12 \quad (2,18b)$$

Kangal linyiti için çizilen Şekil 2.3'deki MN ve KL, 1,45 g/cm³'deki ±0,1 yoğunluktaki küllü ve külsüz malzemenin kazanımlarından çizilmiş olan iki dikey çizgidir. Şekil 2.3'den KLMN'nin altındaki alan aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Sekhar vd., 2007; Mohanta vd., 2016):

$$\int_{0,30}^{0,74} (aX + bX^2 + cX^3) dX - \int_{0,30}^{0,74} (pX + qX^2 + rX^3) dX \quad (2,19a)$$

$$= [\{6(a - p)X^2 + 4(b - q)X^3 + 3(c - r)X^4\}/12]_{X=0,74} - [\{6(a - p)X^2 + 4(b - q)X^3 + 3(c - r)X^4\}/12]_{X=0,30} \quad (2,19b)$$

2.6.2. Sallantılı masa

Sallantılı masa, tabaka halinde akan akışkan ortamda minerallerin özgül ağırlık farkından yararlanarak zenginleştirme işlemini gerçekleştiren yöntemdir. Sallantılı masa, hafif eğimli ve eğimi ayarlanabilen, paralel kenar, dikdörtgene yakın, yamuk veya V şeklinde bir tabladır. Tablanın üzerinde belli yükseklikte ve düzende çıtalar bulunmaktadır. Masanın çalışmasında; serbest akış, engelli çökme, asimetrik hareket gibi fiziksel olaylar etkili olmaktadır. Sarsıntılı masa yüzeyine beslenen mineral taneleri, tabaka halinde akan akışkan ortamın hareketi ile buna dik olan ileri-geri hareketin bileşkesi doğrultusunda diyagonal olarak hareket ederek, ağır mineraller hafif minerallerden ayrılmaktadır. Tabaka halinde akan akışkan ortamda zenginleştirme yöntemleri arasında yaygın olarak kullanılan sarsıntılı masada etkin bir ayırma sağlanmaktadır. Masanın üst kısmında besleme kutusu ve yıkama suyu dağıtıcısı vardır. Su dağıtıcısı kenarı delikli bir oluktan ibarettir. Her delikten akan su miktarı mandallarla ayarlanarak masa yüzeyindeki suyun bir tabaka halinde akması sağlanır. Masanın sarsıntılı hareketi eksantrik mekanizması ile sağlanmaktadır.

Akışkan bir ortam içerisinde eşit terminal hızda çöken tanelerin çapları arasındaki orana eşit çökme oranı denmektedir. Newton bölgesindeki serbest çökme oranı Taggart tarafından “konsantrasyon kriteri” olarak tanımlanmıştır. Formülü ve açıklaması Eşitlik (2,20)’de verilmektedir:

$$k = \frac{\sigma_A - \rho}{\sigma_H - \rho} \quad (2,20)$$

Burada;

k : Taggart konsantrasyon kriteri,

σ_A : Ağır mineralin özgül ağırlığı,

σ_H : Hafif mineralin özgül ağırlığı,

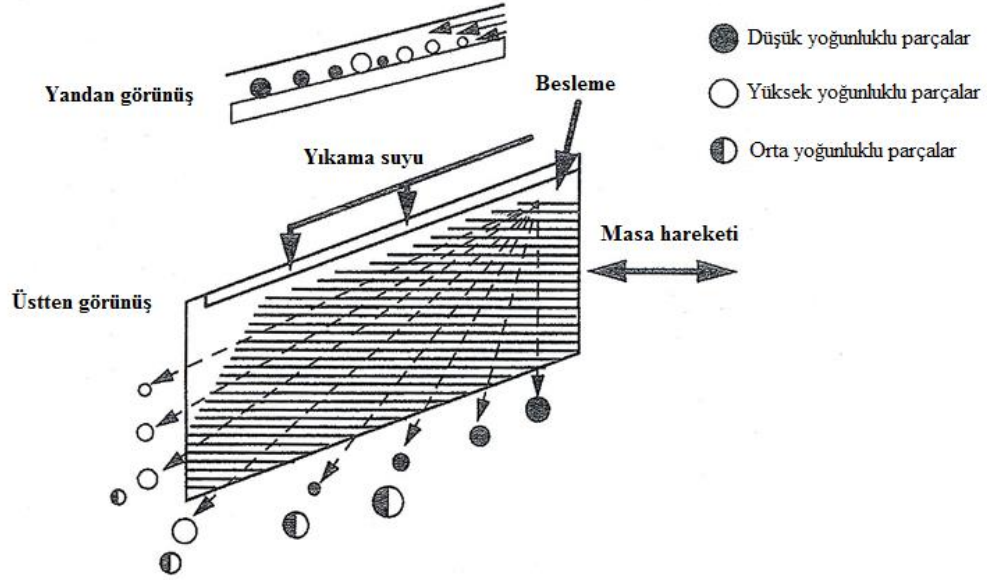
ρ : Akışkan ortamın özgül ağırlığı.

Taggart kriteri (k) 1,25’in üstünde olan herhangi iki mineral, sallantılı masada birbirinde ayrılabilir. Ancak bu değer 2,5 veya daha yüksek olursa iyi bir ayırım sağlanmaktadır (Falconer, 2003; Lee vd., 2012).

Masa tablaları genellikle ağaçtan yapılır ve yüksek sürtünme katsayılı kauçuk ve plastik gibi malzemelerle kaplanmaktadır. Daha pahalı olmasına rağmen, çok daha sert olduklarından fiberglas masalar da bulunmaktadır. Bu tür masalarda çıtalar kalıbın bir parçası olarak masa ile bütün halinde imal edilmektedir. Sarsıntılı masa yüzeyindeki ayırmanın etkinliğini artırmak üzere masa yüzeyi eşiklerle kaplanmaktadır. Eşikler ya sonradan ilave edilen çıtalar veya masa yüzeyi oyularak açılan masa yüzeyleri olup, yükseklikleri mekanizma kenarından konsantre kenarına doğru azalarak konsantre kenarında sıfır olmaktadır. Çalışma şekline bağlı olarak çok değişik eşik tipleri kullanılabilir. Eşiklerin mevcudiyeti akış koşullarını değiştirdiğinden, eşikler arasında engelli çöküş klasifikasyonu gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda hem etkili bir ayırma yapılabilen hem de masa kapasitesi arttırılmaktadır.

Sallantılı masada; şlam, artık, ara ürün ve konsantre olmak üzere 4 ayırma bölgesi bulunmaktadır (Şekil 2.4). Sallantılı masa yüzeyinde bulunan mineral taneleri, tabaka halinde akan akışkan hareketi ile akış yönüne dik olan asimetrik hareketin bileşke etkisi altında hareket ederler. En hafif ve en iri tane, masa hareketi doğrultusunda en kısa mesafeyi kat ederken, yavaş hareket eden en ağır tane masa hareketi doğrultusunda orta mesafede yol alır, en ince ve ağır tane ise en uzun mesafeyi kat eder. İki hareketin bileşkesi sonucunda masa yüzeyinde tane boyutu ve özgül ağırlığına bağlı olarak; iri hafif, ince hafif, iri ağır ve ince ağır mineral tanelerini içeren 4 ayrı kuşak oluşur. Bu kuşakların ayrı ayrı masa yüzeyinden alınması ile de sallantılı masa ayırması gerçekleştirilir.

Sallantılı masa krom, kalay, demir, tungsten (wolfram), tantalum, mika, barit, titan ve zirkon cevherlerinde geniş uygulama alanı bulurken, daha az oranda altın, gümüş, toryum ve uranyum gibi cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır. Diğer yandan, günümüzde sallantılı masa kömür yıkamada, yüksek su tüketimi ve kapasitesinin az olması nedenleriyle eskisi kadar kullanılmamaktadır.



Şekil 2.4. Sallantılı masadaki ayırma bölgeleri (Kawatra ve Eisele, 2001)

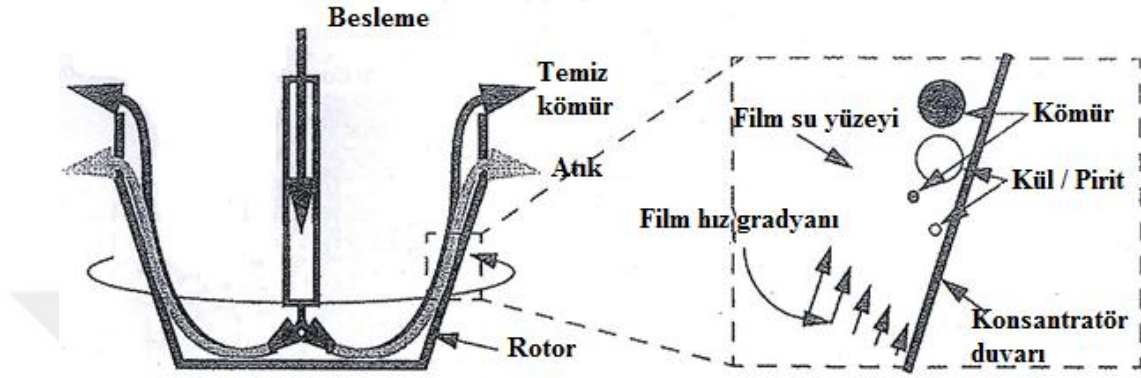
Yüksek seçimliliğe sahip olması sallantılı masaların en önemli avantajıyken, geniş alanlara ihtiyaç duyması, mekanik parçalarının fazlalığı ve düşük kapasiteye sahip olması ise önemli dezavantajları arasında sayılabilmektedir (Falconer, 2003).

2.6.3. Falcon konsantratör

Falcon konsantratörü, ince taneli kömürün temizlenmesinde kullanılan etkin bir gravite ayırıcısıdır. İnce boyuttaki kömürden kükürdün uzaklaştırılmasında, köpük flotasyonu yerine son zamanlarda Falcon konsantratör gibi gravite ayırıcıların kullanıldığı da görülmektedir (Tao vd., 2006; Can vd., 2010; Oruç vd., 2010; Zhang vd., 2011; Boylu, 2013; Boylu 2014; Xia vd., 2015).

Falcon cihazı (Şekil 2.5), temel olarak bir ayırma oluğu ile devamlı çalışan bir santrifüjün kombinasyonudur. Çok yüksek dönme hızı ve buna bağlı olarak yüksek merkezkaç kuvveti nedeni ile farklı yoğunlukta olan çok küçük tanelerin ayırımında kullanılmaktadır (Falconer, 2003). Üstten beslenen malzeme, dönüş hareketinin yarattığı yüksek merkezkaç kuvvetinin etkisi ile yoğunluk farkına göre konik gövdede tabakalaşmaktadır. Malzeme üst bölgeye ulaştığında

yoğunlukça yüksek olan mineraller, yatay dairesel akordeon şeklindeki toplayıcıda birikmekte, birikmiş malzeme belirli aralıklarla yıkanarak buradan alınmaktadır (Kemal ve Arslan 2010, Yıldız, 2014). Falcon konsantratör özellikle çok ince boyutlu kömürler için uygun olan bir gravite zenginleştirme yöntemidir. Dönme hızı, su basıncı ve pülpte katı oranı Falcon konsantratörün ayırma etkinliğinde önemli rol oynayan faktörlerdir (Xia vd., 2015).

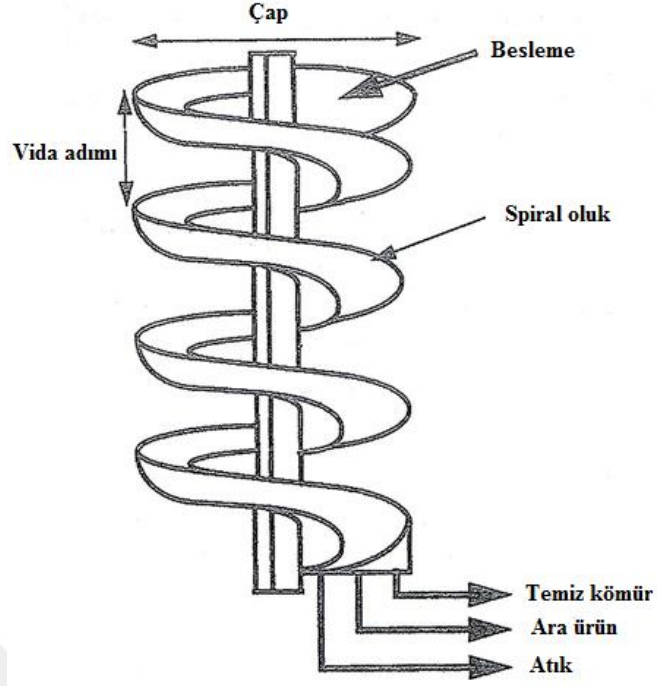


Şekil 2.5. Falcon konsantratörün çalışma prensibi (Kawatra ve Eisele, 2001)

Göreceli olarak basit mekanizması, yüksek kapasitesi ve 15-20 mikron altındaki tanelerde başarılı olması Falcon konsantratörün en önemli avantajlarıyken, ayırma yüzeylerinin görülememesi ve cihazın tıkanmaması için besleme esnasında elek gerektirmesi dezavantajlarıdır (Falconer, 2003; Majumder ve Barnwal, 2006).

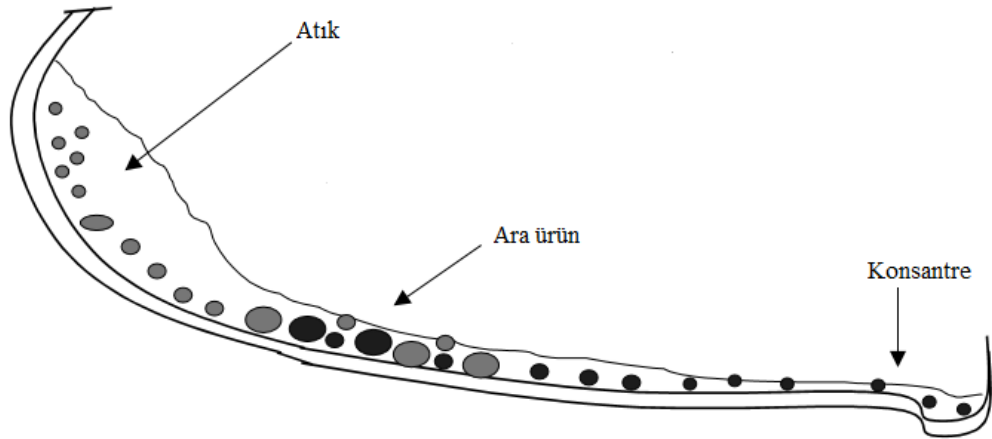
2.6.4. Reichert spirali

Reichert spirali basit bir açıklamayla, bir oluğun, düzenli şekilde spiral olarak kıvrılmasıyla üretilmiştir. Diğer bir ifadeyle, Reichert spirali modifiye edilmiş yarı dairesel kesitli uzun bir oluktan oluşmaktadır. Ortalama 20-30 cm hatve yarıçapına, hatveler arasında ise 30-35 cm yükseklik farkına sahiptir. Bir spiralde en az 5 hatve bulunmaktadır (Yıldız, 2014). Reichert spiralinde zenginleştirme mekanizması karışık olmakla birlikte, farklı yoğunluktaki minerallerin ayrılmasında, tabaka halinde akan su ve merkezkaç kuvvetinin birlikte etkisi söz konusudur. Bunun yanında tanelerin farklı terminal çökme hızları, akan malzeme yatağında ara boşluklardan sızma ve engelli çöküş şartları da ayırmada etkili olmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Reichert spiralinin genel görünümü (Kawatra ve Eisele, 2001)

Spiralin üstünde bulunan besleme oluğundan homojen bir şekilde beslenen cevher-su karışımı (pülp), tabaka halinde aşağıya doğru akmaktadır. Tabaka halinde akan akışkan ortamda tanelerin hareketine bağlı olarak iri ve ince ağır tanelerin yavaş hareketi, ince ve iri hafif tanelerin ise hızlı hareketi ile birlikte merkezkaç kuvvetinin bileşke etkisi sağlanmaktadır. Merkezkaç kuvveti nedeniyle aşağıya doğru akan tabaka kalınlığı hatve merkezine yakın kısımlarda ince, merkeze uzak yan kısımlarda ise kalındır (Şekil 2.7). Bu durumda iri ve ağır mineral taneleri merkeze yakın kısımda toplanırken, ince ve hafif mineral taneleri ise dış duvarlara doğru hareket etmektedir.



Şekil 2.7. Bir spiral hatvesinde taneciklerin hareketinin görünümü (Falconer, 2003)

Reichert spiralinde hafif parçacıklar hatvenin çevresine yakın kısımda toplanırken, ara ürün ve bağlı taneler orta kısımdan, ağır taneler ise hatvenin merkezinden alınmaktadır. İyi bir ayırım için tane boyu sınıflaması ve şlamsızlaştırma (0,05 mm'den ince) yapılmalıdır (Drzymala, 2007).

Spiraller tesislerde, kömür zenginleştirmenin yanı sıra krom, demir, tungsten ve kalay cevherleriyle, sahil kumlarındaki zirkon, rutil, monazit gibi ağır minerallerin zenginleştirilmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Spirallere kömür 3-0,1 mm, ağır cevher 1-0,075 mm boyutlarında pülp halinde beslenmektedir. Beslenen pülp içerisindeki katı oranı %20-50 arasındadır. Spiral ile cevher zenginleştirme işlemi sırasında ürün toplama bıçaklarının (mandal) ayar konumlarına göre konsantre, ara ürün ve atık olmak üzere üç ayrı ürün elde edilebilmektedir. Tek bir spiral ile yeterli konsantre tenörü alınamadığında, paralel ve seri halde bağlanan çok sayıda spiralden oluşan bataryalar halinde de çalışılmaktadır.

Spirallerin en önemli avantajı ekonomik olması, bakım gerektirmemesi ve etkin bir şekilde tesislerde kullanılabilmesidir. Bunun yanında fazla yıkama suyu gerektirmesi ise dezavantajdır (Falconer, 2003).

2.6.5. Flotasyon

Flotasyon, gravimetrik yöntemlerle zenginleştirilmesi mümkün olmayan çok ince boyutlu cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan bir fiziko-kimyasal ayırma yöntemidir. Bu yöntemde, tanelerin farklı yüzey özelliklerinden ve pülp içerisinde oluşturulan hava kabarcıklarından faydalanılır. Tanelerin birbirinden ayrılması; hava kabarcığı ile temas kuran tanelerin (hidrofoblar) yukarıya doğru, kuramayan tanelerin (hidrofiller) ise aşağıya doğru hareketi ile sağlanır.

Flotasyon yöntemi, günümüzde toz kömürün zenginleştirilmesinde (0,5 mm altı) en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Kömür doğal hidrofobik özellikte olduğundan pülpe ilave edilecek hidrokarbon yağı ve köpürtücü sayesinde kömür parçacıklarının yüzeyleri ince bir hidrokarbon tabakası ile kaplanır ve hava kabarcıklarına yapışarak köpükle birlikte konsantre olarak alınırlar. Flotasyon işlemi kömüre üç amaçla uygulanır (Atak, 1990):

- Şlam (-0,5 mm boyutlu) kömürü kazanarak kül ve kükürt oranı düşük bir ürün elde etmek,
- Lavvardan atılan ve siyah su denilen proses suyunu temizleyerek çevre kirliliğini azaltmak,
- Kömür içindeki çeşitli maseralleri ayırarak koklaşabilir bir ürün üretmek.

Kömür türlerine göre flotasyon kolaylığı sırasıyla; koklaşma özelliği olan orta uçuculu kömürler, düşük uçucu madde içeren taşkömürleri, yüksek uçucu madde içeren taşkömürleri, antrasitler ve linyitler şeklinde sıralanmaktadır (Kemal ve Arslan, 2010). Kömür oksitlendikçe

flotasyon zorlaşmaktadır. Genellikle açık havada kalmış ve yüzeyi okside olmuş kömürlere ters flotasyon yöntemi önerilmektedir. Zenginleştirilecek kömürün tane boyutu, kömürün petrografik yapısı, pülpte katı oranı, ortamın pH'ı, kullanılan reaktiflerin cinsi ve miktarı, flotasyon makinesinin tipi gibi parametreler kömür flotasyonunu etkilemektedir.

Genelde ince kömürlerin yüzebilirliği üzerine yapılan çalışmalarda, optimum flotasyon tane boyutu 10 μm 'nin üzeri olarak verilmiştir. 10 μm altında ise şlam nedeniyle flotasyon randımanı önemli ölçüde düşmektedir. Parçacıkların boyutu incelidikçe, elde edilen temiz kömürdeki kül miktarı artmaktadır. İnce kömür flotasyonunda, özellikle parçacık-kabarcık çarpışması ayrıntılarıyla incelenmelidir. Kömürün tane boyutu küçüldükçe artan spesifik yüzey enerjileri, parçaların daha fazla reaktif tüketmesine ve reaktiflerin seçimli olmayan adsorpsiyonlarına neden olmaktadır. Ayrıca yüksek yüzey enerjileri ve alanları nedeni ile parçaların çözünürlüğü, hidrasyonu ve oksidasyonu artmaktadır. İnce parçacıkların yüksek çözünürlüğü ise, çözeltide istenmeyen safsızlıkların oluşmasına ve böylece toplayıcı-parçacık ilişkisinin olumsuz şekilde etkilenmesine neden olmaktadır (Laskowski, 2001).

Kömür heterojen bir madde olup, yüzeyi anizotropik bir özellik gösterir. Anizotropik yüzeyler iki kısımdan meydana gelmektedir. Birincisi Van der Waals bağlarının kırılmasıyla meydana gelen hidrofobik yüzeyler, ikincisi ise iyonik ve kovalent bağların kırılmasıyla meydana gelen hidrofilik yüzeylerdir. Yani kömür yüzeyi hidrofob özellik gösteren kısımları içerdiği gibi, kimyasal bağların kırılmasıyla ortaya çıkmış hidrofilik özellik gösteren oksit grupları ve inorganik safsızlıkları da içermektedir. Kömürün yüzeyindeki negatiflik, hidrofilik özelliği gösteren bu kısımlardan ileri gelmektedir. Kömür flotasyonunda toplayıcılar emülsiyeye edilmiş halde veya direkt olarak pülpe ilave edilirler. Oluşan yağ damlacıkları, kömür yüzeyini bir film şeklinde kaplayarak, yüzeyi daha hidrofobik yapar ve hava kabarcığı ile tane arasındaki adhezyon (yapışma) kuvvetini artırırlar. Yapılan çalışmalar, hava kabarcığı-kömür teması sağlandığında yağın üç faz temas hattı boyunca yayıldığı ve adhezyon kuvvetini arttırdığını göstermiştir. Yeni üretilen bir kömürün, oksidasyona uğramış kömürden daha iyi yüzdüğü bilinmektedir. Kömürün yüzeyinde oksitlenme neticesinde OH^- ve COOH^- gibi grupların oluştuğu saptanmıştır. Normal atmosfer sıcaklığında bile havanın oksijeni kömür yüzeyini oksitleyerek flotasyon yeteneğini azaltmaktadır. Oksitlenme düşük kömürleşme dereceli kömürlerde daha fazladır. Buna bağlı olarak, turba ve linyit gibi düşük kömürleşme dereceli kömürlerin flotasyon yeteneği azdır. Kömürü meydana getiren mesarallerden vitren çok çabuk oksitlenirken, oksitlenme özelliği füsün, düren, klaren ve vitren'e doğru artmaktadır (Laskowski, 2001).

Değişik kömürlerle yapılan flotasyon çalışmalarında, nötr pH'ta kömür yüzeylerinin negatif yüklü olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kömürün yüzeyindeki oksidasyon artışının, zeta potansiyelinin negatif değerini de arttırdığı belirlenmiştir. Linyit kömürleri üzerinde yürütülen

Çalışmalarda ise şarjın sıfır noktasının (zpc) pH 2-5 civarında olduğu tespit edilmiştir. Farklı hidrokarbon yağlar ve endüstriyel ölçekte kullanılan yağlarla yapılan çalışmalarda yüzey yükünün pH'a bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Mazot, fuel-oil ve bunların değişik oranlardaki karışımları ile yapılan çalışmalarda karışımdaki fuel-oil miktarı arttıkça şarjın sıfır noktasının daha yüksek pH değerine kaydđı tespit edilmiştir (Parekh ve Miller, 1999).

Bütün katılarda olduğu gibi kömürün de doğal yüzme özelliği temas açısıyla belirtilir. Genellikle yüksek kömürleşme derecesindeki kömürlerde temas açısı 10°-20° arasında değişirken, düşük kömürleşme derecesindeki kömürlerde temas açısı 0°'ye kadar düşmektedir. Saf su içerisinde çeşitli kömür yüzeylerinde 20°-65° arasında değişen temas açılarının ölçüldüğü belirtilmiştir (Parekh ve Miller, 1999).

Kömürün nem miktarı flotasyonu ters yönde etkilemektedir. Linyitten antrasite doğru gidildikçe nem miktarı azalır. Buna bağlı olarak da kömürün yüzebilme yeteneği artar (Parekh ve Miller, 1999).

Kömürün kül miktarının flotasyon üzerine etkisi fazladır. Mineral maddeler (inorganikler) suda kolaylıkla ıslanabilir özellik gösterdiklerinden, kömürün kül miktarı arttıkça doğal yüzebilirlik ve temas açısı azalmaktadır (Parekh ve Miller, 1999).

Kömürün petrografik yapısı da yüzebilirliği etkiler. Örneğin; vitren gibi parlak bileşenler, düren gibi mat bileşenlere göre daha fazla hidrofobik olduklarından daha iyi yüzerler (Laskowski, 2001).

Flotasyon pülpünde kömür taneleriyle yağ damlacıklarının birbiriyle etkileşimi çarpışma yoluyla olur. Çarpışma olayının olması ve bunun sonucunda kömür taneleriyle yağ damlacđının adhezyonunun sağlanması, kömür yüzeyi üzerinde hidrofobik bir film oluşması için yeterli koşul değildir. Bunun için yağ damlacđı veya damlacıklarının kömür yüzeyi üzerinde yayılması gerekmektedir. Aksi takdirde yüzebilirlik çok düşük olmaktadır (Parekh ve Miller, 1999; Wang vd., 2010).

İyi bir flotasyon işlemi için gerekli koşullar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çok iyi emülsiye edilmiş yağ,
- Partikül-yağ damlacđı çarpışmasının arttırılması,
- Yağ damlacđı ve kömür taneleri arasında oldukça düşük elektriksel itme enerjisi,
- İyi bir difüzyon işlemi için yağların yüzey ve su ile olan ara yüzey geriliminin yeterince düşük olması,
- Yağ viskozitesinin, emülsiyon ve yüzey yayılmasının kolaylıkla olduğu ancak por (gözenek) doldurma eğiliminin arttığı değere kadar düşürölmesi.

1 mm boyutunun altındaki kömürler genellikle nötr hidrokarbonlar ve fuel oil kullanılarak, doğal pH'ta kolaylıkla yüzdürülmektedir. Köpürtücü olarak metil izobütil karbinol (MIBC) veya izooktanol gibi kısa zincirli alkoller kullanılmaktadır. Bazı durumlarda ise, ters flotasyonla kömür bastırılarak piritik kükürt ksantatlarla yüzdürülmektedir (Asmatülü ve İpekoğlu, 1995). Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Kömür flotasyonunda kullanılan reaktifler (Laskowski, 2001)

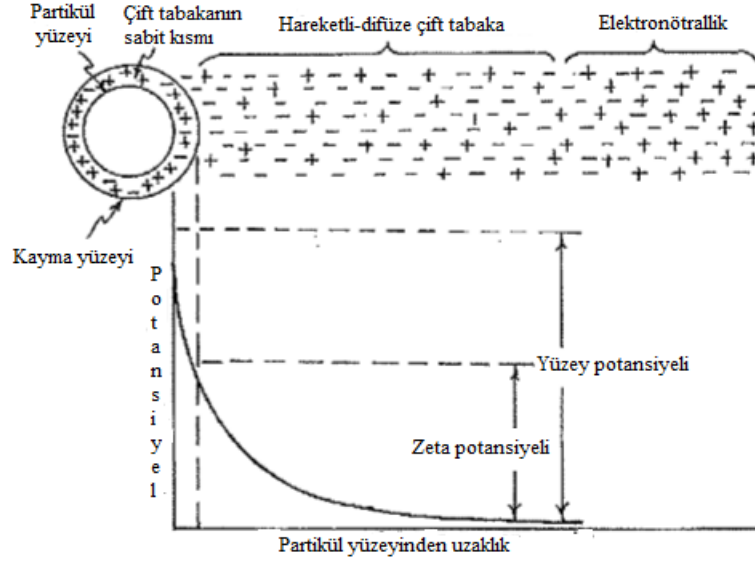
Tip	Flotasyondaki kullanımı	Fonksiyonel grup	Örnekler
Nonpolar (suda çözünmeyen)	Toplayıcılar	-	Kerosen, fuel oil
Yüzey aktif (suda çözünen)	Köpürtücüler	Hidroksil	Alifatik alkoller, piridin içeren katran yağları
Emülgatörler (yağlı toplayıcılarda çözünen)	Destekleyiciler	Hidroksil, Karboksil	Polietoksilat alkoller, yağ asitleri vb.
İnorganikler (tuzlu su çözümleri)	Düzenleyiciler	-	NaCl ₂ , CaCl ₂ , Na ₂ SO ₄ , H ₂ SO ₄ .CaO, CaO
Koruyucu kolloidler	Bastırıcılar	Hidroksil, Karboksil	Polimerler, nişasta, dekstrin, karboksimetil selüloz vb.

2.6.6. Zeta potansiyel

Kolloidal partiküller dispersiyon ortamında iyon adsorbe ederler. Pozitif ve negatif olarak yüklenirler. Her partikül pozitif ve negatif yüklü oluşuna göre, aksi yöndeki iyonlarla çevrilebilirler. Böylece tek tabakalı bir yapı oluşur. Bu tabakanın etrafında da partiküle bağlı olmayan, hareketli ikinci bir iyon tabakası yer alır. Bu tabakaya Helmholtz çift tabakası veya hareketli difüze çift tabaka denir. Partikül yüzeyine yapışmış olan elektriksel tabakanın potansiyeline elektrotermodinamik potansiyel veya Nernst potansiyeli denir (Çelebi, 2009).

Çift tabakanın dışında da pozitif iyonların negatif iyonlara eşit olduğu nötral bir alan vardır. Partikülün yüzeyi ile bu nötral bölge arasındaki potansiyel farkına zeta potansiyel denir. Diğer bir deyişle, zeta potansiyel partikülün yüzeyi üzerindeki net etkili yükü gösterir (Şekil 2.8).

Zeta potansiyel, partikül ile içinde bulunduğu sıvı arasında oluşur. Partiküller arasında itme ve çekme kuvvetleri oluşmasına neden olur. Bir sıvı içerisindeki aynı yükteki partiküller birbirlerini iter, farklı yükteki partiküller ise çeker. Bu çekme ve itme kuvveti partikülün zeta potansiyel değerine bağlıdır. Zeta potansiyel partikülün içinde bulunduğu sıvının pH değeri ile değişir. Değişimin sıfır eksenini kestiği pH değeri izoelektrik nokta olarak adlandırılır.



Şekil 2.8. Zeta potansiyelin şematik olarak gösterimi

İzoelektrik noktası, kolloidal sistemin en kararsız olduğu pH değeri anlamına gelir. Zeta potansiyelin birimi milivolttur (mV) ve zetametre ile ölçülür. Zeta potansiyel, kolloidal dağılımların stabilitesinin değerlendirilmesinde önemlidir. Partiküller düşük zeta potansiyeline sahipse partiküllerin bir araya toplanmasını engelleyecek kuvvet bulunmadığından, topaklanma ve çökme oluşur. Ne kadar yüksek olursa, kolloidal dağılımların stabilitesi de o kadar iyidir (Çelebi, 2009).

2.6.7. Piroliz

Piroliz, oksijensiz ortamda ısıtma yoluyla özellikle kömür gibi fosil yakıtlardan gaz, sıvı ve katı ürünler üretme prosesinin genel adıdır. Bu proses, aynı zamanda karbonizasyon olarak da isimlendirilmektedir (Altun vd., 2003). Piroliz, genellikle hava veya diğer bazı gazların varlığında kömürün termal bozunması olarak tanımlanmaktadır (Zhang, 2005).

Piroliz için teorik olarak gerekli ısı miktarı, organik maddenin kimyasal yapısını bozacak ve yeni kimyasal maddelerin oluşumunu sağlayacak düzeyde olmalıdır. Isıl bozundurma işlemi, katı yakıt açısından değerlendirildiğinde karbonizasyon; gaz ve sıvı yakıt açısından değerlendirildiğinde ise piroliz olarak isimlendirilmektedir. Kullanılan sıcaklığa bağlı olarak 500°C-600°C düşük sıcaklık pirolizi veya semi-karbonizasyon, 900°C-1100°C ise yüksek sıcaklık pirolizi veya koklaşma olarak adlandırılmaktadır. Yüksek sıcaklık karbonizasyonunun temel amacı metalürjik kok üretmektir. Düşük sıcaklık karbonizasyonu ise, sokakların aydınlatılmasında, kimya sanayinde katran ürününde, yerel ve endüstriyel amaçlı dumansız yakıt eldesinde kullanılmaktadır (Sychkov vd., 2009; Miller, 2005).

Piroliz yüksek kaliteli katı ürün (çar) veya bir takım gaz ve sıvı ürünler elde edebilmek için yapılan en önemli dönüşüm proseslerinden biridir (Altun vd., 2003). Piroliz esas olarak, kömürü hidrojen zengin uçucu bir fraksiyonla, karbonca zengin katı kısma ayıran bir işlemdir. Karbonizasyonla sıvı ve gaz yakıt üretilerek, içten yanmalı motorlar için sentetik yakıt elde edilebilmekte, katı yakıtlardaki kükürtten oluşan çevre kirliliği de önlenmektedir. Karbonizasyon işlemi ayrıca kok üretimi ve briketleme amaçları için de uygulanmaktadır (Ballice, 2002).

Pirolizde, kömür termal olarak gaz, sıvı ve katı ürünlere dönüştürülmektedir. Geleneksel piroliz süreçleri, yüksek verimli, ucuz maliyete sahip sürekli sistemler olup, piroliz ürünleri gaz, odun kömürü ve pirolitik sıvı olmaktadır. Süreç şartlarına bağlı olarak ürünler farklı miktarlarda elde edilmektedirler. Gaz ürün için 650°C'nin üzerindeki sıcaklıklar kullanılırken, sıvı ürün için düşük sıcaklıklar tercih edilmektedir (Miller, 2005).

Kömür molekülü, yoğun aromatik yapılanmalar ve bu yapıları birbirine bağlayan alifatik bağlar ve çeşitli fonksiyonel gruplar olmak üzere, üç boyutlu polimerik bir yapı olarak kabul edilmektedir. Kömür ısıtıldığında, önce birincil piroliz tepkimeleri ve ardından ikincil piroliz tepkimeleri gerçekleşmektedir (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998).

Kömürün birincil pirolizi, çeşitli paralel ve ardışık tepkimeleri içermektedir. Önce, aromatik yapılanmalar arasındaki kimyasal bağların ısı parçalanması gerçekleşmekte, bunun sonucunda, serbest radikaller oluşmaktadır. Sonra, bu radikaller, atomların yeniden düzenlenmesi ya da başka cins atomlarla birleşmesiyle kararlı yapılara ulaşmaktadırlar. Kararlı bileşiklerin hafif fraksiyonları katranı, daha ağırları ise çarın (piroliz sonucu elde edilen katı ürün) bir bölümünü oluşturmaktadırlar. Pirolizde, birincil uçucu giderme tepkimeleri sonucunda, gaz, sıvı ve katı ürünler oluşmaktadır. Kararsız, birincil uçucu bileşikler, ikincil tepkimelere girebilmektedirler. İkincil tepkimeler, çatlama (cracking) ve/veya buharlaştırma ya da polimerizasyon şeklinde gelişmektedir. Böylece, molekül yapıları küçülmekte ya da büyümekte, katı-sıvı ürün dağılımı etkilenmektedir (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998).

Pirolizden elde edilen gaz ürün, kompleks ısı parçalanma proseslerinden elde edilen CH₄ gibi doymuş ve H₂ ve CO gibi doymamış hidrokarbon karışımları ve gazları içermektedir. Bileşim olarak H₂, CO₂, CO, CH₄, H₂O ve organik bileşiklerin buharlarından oluşmaktadır. Elde edilen gaz ürün, güç santrallerinde, ısıtma işlemlerinde ve beslemenin kurutulmasında kullanılabilir. Pirolizden elde edilen sıvı ürünler oldukça kompleks, su veya suda çözünen düşük molekül ağırlıklı veya yağ olarak adlandırılan suda çözünmeyen yüksek molekül ağırlıklı organik bileşiklerdir (Miller, 2005).

Kömürün pirolizinde, nitelik ve nicelikleri proses değişkenlerine bağlı olarak değişen ürünler (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998);

- *Gaz ürün:*

Piroliz gazı karbon oksitleri, hafif alifatik hidrokarbonlar, hidrojen ve su buharı karışımıdır. Gazlardaki su buharı, kömür neminin buharlaşmasının yanı sıra, çeşitli kimyasal tepkime ve bozunmalar sonucunda da oluşmaktadır. Piroliz gazı, kömürün yapısındaki bağların kırılmasıyla oluşmaktadır. H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 ve C_3H_8 gibi alifatik hidrokarbonlar, CO_2 ve CO gibi düşük molekül ağırlıklı maddeler içermektedir. Bu gaz aynı zamanda, kömürdeki inorganik ve organik kükürtlü yapıların bozunması sonucu, çevreyi kirletici nitelikteki kükürtlü bileşikler de içerebilmektedir. H_2S ve NH_3 , piroliz gazında istenmeyen bileşiklerdir. Değişik kömürler ve piroliz şartları uygulanarak yapılan çalışmalar sonucunda gaz ürünlerin hacimce bileşiminin; %8-55 CH_4 , %1-43 C_2 ve C_3 hidrokarbonları, %14-67 H_2 , %5-38 CO , %1-24 CO_2 şeklinde değiştiği ve gaz ürünün, kömürün ağırlıkça (kuru bazda) %2-26'sını oluşturduğu saptanmıştır.

- *Sıvı ürün:*

Sıvı ürün, katran veya pirolitik yağ olarak adlandırılmaktadır. Piroliz sonucunda elde edilen sıvı ürün şeffaf, reçinemsiz, başlangıçta sarımsı-turuncu renkte olup ışık etkisiyle, hızla siyaha dönmektedir. Sıvı ürünün nitelik ve niceliği, kömürün karbon, oksijen ve hidrojen atomlarının oranlarına ve piroliz sürecinde oluşan yapı taşlarının hidrojen ile birleşebilirliklerine bağlı olmaktadır. Kömürde rank yükselip, oksijen içeriği azaldıkça sıvı ürün miktarı artmakta, kimyasal su oluşumu azalmaktadır. Bu artış, kömürün karbon içeriği %85-86'ya ulaştığında, yerini düşüşe bırakmaktadır. Değişik kömürler ve piroliz şartları uygulanarak yapılan çalışmalar sonucunda, kuru baza göre, kömürün %2-33'ünün sıvı ürüne dönüştüğü gözlenmiştir. Sıvı üründe; alkil benzenler, mono ve dihidrik fenoller, piridin türevleri, n-parafinler, olefinler, parafin vaksları ve naftenler bulunmaktadır.

- *Katı ürün:*

Karbonca zengin katı ürün, çar olarak da adlandırılmaktadır. Değişik kömürler ve piroliz şartları uygulanarak yapılan çalışmalar sonucunda, katı üründe elde edildiği kömüre göre, kükürt içeriğinin azaldığı, karbon ve azot içeriğinin ise arttığı gözlenmiştir.

Pirolizde etkili önemli proses değişkenlerinden biri sıcaklıktır. En yüksek katran veriminin elde edildiği sıcaklık, kömürün rankına ve oluşan katranın kararlılığına bağlı olarak değişmektedir. Bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda da, gaz tepkimeye girmeye devam etmekte ve toplam uçucu bileşik verimi de artan sıcaklığa paralel olarak artmaktadır (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998). Yüksek sıcaklıklarda katran bozunarak gaz ürün miktarını da arttırmaktadır. Artan basınçla uçucu maddelerin tepkimede kalma süresi azalmaktadır. Orta sıcaklıklarda düşük basınç ile katran miktarı artmaktadır. Piroliz sıcaklığı, uçucu maddenin miktar ve bileşimini etkileyen önemli bir parametredir. Sıvı, gaz ve katı miktarları piroliz sıcaklığı ile değişmekte ve bunların kimyasal bileşimleri de oldukça farklı olmaktadır. Piroliz sıcaklığının

artması ile sıvı ürünün ve aktif karbonun H/C ve O/C oranları azalmaktadır. Uzun piroliz sürelerinde uçucu ürünlerin bozunduğu ve karbon atığının tekrar gazlaştığı gözlenmektedir. Kısa piroliz sürelerinde yapılan piroliz işlemlerinde, işlem sıcaklığı ile kimyasal bileşim arasında doğrudan bir bağıntı bulunmaktadır. Sıcaklık arttıkça, yapıdaki oksijen içeriği ve C/H oranı azalmaktadır. Piroliz işleminde, parçacık boyutunun artması ile uçucuların gaz atmosferine geçişi hızlanmakta ve bu durumda kütle iletim sınırlaması söz konusu olmaktadır. Uçucular yüzeyle daha uzun süre etkileşmekte ve ikincil tepkimelerin (yeniden polimerleşme ve sıcak katı yüzeyinde çeşitli parçalanma tepkimeleri) oluşumuna neden olabilmektedir. Polimerleşme tüm piroliz verimini düşürürken, yüzeyde parçalanma tepkimeleri sıvı verimini azaltıp, gaz verimini artırma yönünde etki etmektedir. Katı yakıtlarda H/C oranı arttıkça yakıt, sıvı yakıt özelliğine yaklaşmaktadır. Karbon içeren maddelerin dönüşümü ile gaz ve sıvı yapay yakıtlar elde edilmektedir (Miller, 2005).

Kömürün ısı bozunmasında sıcaklık-zaman ilişkisi önemli olmaktadır. Bu ilişki, ısıtma hızı değişiminden doğrudan etkilenmektedir. Yüksek ısıtma hızlarında, katranın uçucu bileşiklerinin ayrılmasının yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği ve yüksek uçucu giderme verimlerinin de arttığı bilinmektedir. Reaktördeki gazın, inert veya reaktif olması ve basıncı da pirolizi etkilemektedir. İnert ortamda, gaz basıncının artışıyla katran ve toplam uçucu bileşen verimi azalmakta, çünkü basınç, uçucu bileşenlerin tanecik içinde kalma süresini arttırmaktadır. Ortamda reaktif bir gaz varsa, gazın kimyasal yapısı tepkimeleri etkilemekte, bu etkiler artan basınçla daha karmaşık hale gelmektedir. Pirolizde, uçucu bileşenlerin taşınımı, tanecikler arasından geçen gazın hızından etkilenmektedir. Uçucu bileşenlerin, tanecik içinden yüzeye, daha sonra da gaz ortam içinde taşınımı, artan sıyrıcı gaz hızı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Yüksek gaz hızlarında, büyük moleküllerin taşınımları da gerçekleşebilmektedir (Özdoğan ve Karaosmanoğlu 1998).

Kömürün pirolizi boyunca H_2 , CO, CH_4 ve diğer hidrokarbonlar gibi yanıcı gazlar, katran buharları, CO_2 ve su buharı gibi bazı yanıcı olmayan gazlardan meydana gelen uçucu maddelerin çıkışı olmaktadır. Kömürdeki uçucu maddenin miktarı ve kompozisyonu kömürleşme derecesiyle büyük değişkenlik göstermektedir. Kömürün rankı ve maseral yapısı, piroliz ürünlerinin bileşimini etkilemektedir. Bitümlü kömürden, alt bitümlü kömür ve linyite doğru gidildikçe, uçucu bileşikler içindeki katran miktarı düşerken, karbon oksitler, hidrokarbonlar ve su buharı miktarları artmaktadır (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998).

Kömürün tane büyüklüğü de pirolizi etkileyen önemli bir özelliktir. Tane büyüklüğü, içinde oluşan uçucu bileşiklerin kömürün dış yüzeyine taşınmasını etkilemektedir. Tane büyüklüğünün artması, uçucu bileşiklerin, daha uzun süre kömür yapısı içinde kalmalarına ve ikincil tepkimelere girmelerine neden olmaktadır. Ayrıca, büyük taneler içinde sıcaklık farklılıkları da oluşmaktadır.

Tane büyüklüğü, ısı ve kütle taşınımını etkilediği için pirolizi de büyük oranda etkilemektedir. Ancak, tane boyutunun etkisi incelenirken, kömür hazırlama işlemi önemli olmaktadır. Bu işlemde, boyuta bağlı olarak, maseral kısım ayrılırsa, bileşim de değişebileceğinden, bileşim ve tane boyutu birlikte çift etki oluşturabilmektedirler (Özdoğan ve Karaosmanoğlu, 1998).

2.6.8. Sıvılaştırma

Genel olarak kömür sıvılaştırması, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında kömürün hidrojen verici çözücü ve katalizör kullanılarak serbest radikallere parçalanması ve bu radikallerin hidrojenle doyurularak hem sıvı yakıt hem de kimyasal hammadde üretilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Li vd., 2009). Kömür sıvılaştırma yöntemleri doğrudan (direkt) sıvılaştırma ve dolaylı (indirekt) sıvılaştırma olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır.

Doğrudan sıvılaştırmada, kömürün moleküler yapısını mümkün olduğu kadar bozmadan H/C oranı yükseltilerek, kömür sıvı ürünlere dönüştürülmektedir. Genellikle yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleşen doğrudan sıvılaştırma tepkimeleri sırasında, sıcaklık 400°C'yi aştığında, kömür matrisi pirolitik olarak kırılmaya başlar; alkil, kükürt, su giderme, termoliz, zincir açılma, yapısal birimler arasındaki köprülerin kırılması şeklinde pek çok tepkime oluşmaktadır. Bu tepkimeler, doğrudan sıvılaştırmanın ilk aşamasıdır. Kömürün makromoleküler yapısının ısı ya da katalitik olarak kırıldığı bu aşama, depolimerizasyon olarak isimlendirilmektedir. İkinci aşama ise, zayıf bağların kırılmasıyla oluşan serbest radikallerin kararlılığıdır. Hidrojen, moleküler hidrojenden veya hidrojen veren çözücülerden sağlanır. İyi bir hidrojen veren ortam bulunmadığı zaman, oluşan serbest radikaller birleşir ve kok oluşturur. Daha sonraki aşamada, hidrojen veren çözücü veya moleküler hidrojen, kömür parçacıklarının arasına difüzlenerak çözünmeyi gerçekleştirir. Bu sırada, çözücü ile serbest radikaller arasında hidrojen aktarımı gerçekleşir. Yeterli hidrojen veren ortam olduğunda, kömürün ısıl bozunma hızı, hidrojen aktarım hızını belirler (Dinçer vd., 1998).

Dolaylı kömür sıvılaştırılmasında, kömür önce gazlaştırılıp sentez gazı ($\text{CO} + \text{H}_2$) elde edilmekte ve sonra özel katalizörler kullanılarak değişik sıvı ürünler ve değerli bazı kimyasal maddeler elde edilmektedir (Li vd., 2009).

Dolaylı ve doğrudan sıvılaştırma yöntemleri karşılaştırıldığında dolaylı sıvılaştırma yöntemi; kömür bulamacının doğal aşındırıcılık özelliğinden kaynaklanan proses zorlukları, tetralin gibi pahalı hidrojen veren çözücülere ihtiyaç duyması ve katı sıvı ürünlerin ayırımındaki zorluklardan kaynaklanan dezavantajları olmasına rağmen daha yüksek enerji etkinliği ve daha fazla ürün çeşitliliğine sahiptir (Shui vd., 2010). Kömürün doğrudan veya dolaylı sıvılaştırılması sonucunda elde edilen kömür sıvılaştırma ürünleri, çalışma koşullarına bağlı olarak genellikle yağlar, asfaltlar ve preasfaltlar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Bu tür gruplandırma

çözünebilir ürünlerin, çeşitli çözücülerdeki çözünme durumlarına göre yapılmaktadır. Pentanda (C_5H_{12}) veya hekzanda (C_6H_{14}) çözünebilenler yağlar; pentanda veya hekzanda çözünmeyip benzende (C_6H_6) veya toluende (C_7H_8) çözünebilenler asfaltenler (AS); benzende veya toluende çözünmeyip tetrahidrofuran (THF)'da (C_4H_8O) çözünebilenler ise preasfalten (PAS) olarak adlandırılmaktadır (Dinçer vd., 1989).

Yağlar kömür sıvılaştırma ürünleri içinde en çok istenilen gruptur. Molekül ağırlığı 100-300 arasında değişmektedir. Yağlar genellikle eterler, tiyoeterler, polinükleer bileşikler ve bazik olmayan azot bileşiklerinden oluşmaktadır. Molekül ağırlığı 300-700 arasında değişen asfaltenler ağırlıklı olarak fenoller, bazik azot bileşikleri ve eterler gibi mono-fonksiyonel bileşiklerden oluşmaktadır. Molekül ağırlığı 400-2000 arasında olan preasfaltenler ise, çok fonksiyonlu bileşiklerden oluşmaktadır (Dinçer vd., 1989).

Kömürün sıvılaştırılması; kömürleşme derecesi, kömürün fiziksel ve kimyasal yapısı tarafından etkilenmektedir (Ateşok, 2009b).

Kömürleşme derecesi arttıkça karbon içeriği, aromatiklik, kondense halkalarının sayısı ve boyutu, ısı değer artarken; uçucu madde, oksijen içeriği, oksitlenme özelliği ile sulu bazik çözeltide çözünürlük azalmaktadır. Karbon içeriği %88'den fazla olan kömürler, genelde fazla miktarda aromatik halka ve düşük miktarda reaktif hidrojen ve fonksiyonel grup içerdiklerinden, sıvılaştırılmaları zor olmaktadır. Linyitlerin aromatik karbon içerikleri düşük ve oksijen içerikleri yüksek olduğundan, fazla miktarda hidrojen tüketimine neden olmaktadır. Buna karşılık, sıvılaştırma sırasındaki reaktiviteleri oldukça fazladır (Ateşok, 2009b).

Kömürün ekstraksiyon ile çözünebilen organik madde içeren, üç boyutlu çapraz bağlı makromoleküler bir yapıda olduğuna inanılmakta ve bu yapının, kömürün birçok özelliğini kontrol ettiği düşünülmektedir. Bu modele göre; kömürün çözünmeyen kısmı, çapraz bağlı ağ yapıyı temsil etmektedir. Bu ağ yapı, kovalent bağlar ve hidrojen bağları ile bir arada tutulmaktadır. Piridin gibi güçlü hidrojen bağları oluşturabilen çözücülerin etkisiyle bu yapıdaki zayıf hidrojen bağları kırılmakta, ağ yapısı daha zayıf olarak bir arada tutulmakta ve bunun sonucunda, kömür şişmektedir. Kömürün şişme özelliği, sıvılaştırmada önemli rol oynamaktadır. Şişme ile, kömürün yapısı genişlemektedir. Bu genişleme, çözücünün kömürün içine daha kolay girmesini ve tepkime ürünlerinin kömürün yapısında kolay ve hızlı bir şekilde difüzyonlanmasını sağlamaktadır (Ateşok, 2009b).

Kömürdeki karbonun büyük bir kısmı aromatik karbon olup, aromatik halka yapısında bulunmaktadır. Bu halka yapısının sıklığının bilinmesi, sıvılaştırma tepkimelerinin aydınlatılmasında gereklidir. Genelde %80'den daha az karbon içeren kömürlerde, yapıdaki ortalama halka sayısı 2; %80 ile %90 arasında karbon içeren kömürlerde ise bu sayı 3 olmaktadır. Alifatik karbon yapısı hakkındaki bilgiler yetersiz olup, düşük dereceli kömürlerde uzun zincirli

alifatik karbon bulunduğu bilinmektedir. Fonksiyonel grupların çeşitleri ve dağılımlarının bilinmesi, sıvılaştırma sırasında kömürün nasıl davranacağına ışı tutmaktadır. Özellikle belirli şartlar altında, hangi bağların önce kırılacağı bilinmesi, tepkime kinetiği açısından önemlidir. Karbon içeriği %89'dan düşük olan parlak kömürlerin hidrojenasyonunun daha kolay gerçekleştirildiği, %89'dan yüksek olan parlak kömürlerin ise daha az reaktif oldukları ve oldukça düşük dönüşümler gösterdikleri bilinmektedir. Yağ verimi, kömürleşme derecesinin düşmesi ile birlikte artış göstermektedir. Buna karşılık, karbon içeriği arttıkça asfaltan verimi artmakta ve %80 karbon içeriği olan kömürlerde, bu verim maksimuma ulaşmaktadır (Ateşok, 2009b).

Karbon ve hidrojenen sonra kömürde en çok bulunan element oksijen olup, kömürleşme derecesi arttıkça oksijen içeriği düşmektedir. Oksijen, hem organik hem de inorganik fonksiyonel gruplarda bulunmaktadır. Bitümlü kömürlerde, hidroksil grubu hidrojen bağının, kekleşme özelliğini büyük ölçüde etkilediği bilinmektedir. Linyitlerin ise, büyük miktarda su içermelerinden dolayı, jel yapıda oldukları düşünölmektedir. Linyitlerin içerdii bu suyun, kömürde büyük oranda bulunan polar oksijen fonksiyonel gruplarından kaynaklandığı bilinmektedir. Suyun ayrılmasının, linyit yapısında tersinmez değişikliklere yol açtığı saptanmıştır (Ateşok, 2009b).

Azot, pek çok kömürde, ağırlıkça %2'den daha az miktarda olup, kömürleşme derecesi arttıkça azot miktarının azaldığı bilinmektedir. Bunun olası nedeninin, amino grupların, halka yapısında bulunan heterosiklik azota dönüşmesi olduğu düşünölmektedir. Azotun organik matrise nasıl bağlı olduğunun bilinmesi, kömürün sıvılaştırılması tepkimelerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması bakımında önemli olmaktadır (Ateşok, 2009b).

Kömür, organik ve inorganik kükürt içermektedir. Kükürt miktarı ve şekli, kömürleşme derecesi ile yakından ilgili olmaktadır. İnorganik kükürdün büyük bir kısmını piritik kükürt oluşturmaktadır. Organik kükürdün tipleri tam olarak bilinmemekle birlikte, alifatik ve aromatik -SH gruplarından ve tiyofenlerden oluştuğu düşünölmektedir. Organik kükürt içeriği genelde, kömürün sülfid, disülfid ve tiyoeter bağlarının miktarını göstermektedir. Bu tür bağların, sıvılaştırma sırasında kolaylıkla parçalanarak, reaktif kömür radikallerinin oluşmasında etkili olduğu bilinmektedir. Ayrıca, yüksek organik kükürt içeriği, hidrojen aktarım aracı olarak görev yapan H₂S'in çıkışı artırılmaktadır. Demir sülfatların yani sülfat yapısındaki kükürtlerin, kömür sıvılaştırma tepkimeleri sırasında, çok etkin bir katalizör olan pirotine indirgendii gözlenmiştir (Ateşok, 2009b).

Kömürün değişik oranlarda organik ve inorganik bileşen içeren heterojen yapısı, makroskopik ve mikroskobik seviyede incelenilmektedir. Mikroskobik seviyede, kömür tabakaları maserallerden oluşmaktadır. Genelde, kömürdeki maseral bileşiminin kömür reaktivitesini etkiledii düşünölmektedir. Sıvılaştırma sırasında, vitrinit ve inertinit gruplarının

sıvılaştırmaya daha yatkın olduğu, inertinit grubunun ise inert kaldıkları bilinmektedir. Kömür sıvılaştırılmasında maserallerin reaktiviteleri liptinit>vitrinit>inertinit sırasında artmaktadır. Dönüşümün, kömürleşme derecesi ile büyük oranda değiştiği; altbitümlü, orta ve düşük uçuculu bitümlü kömürler düşük dönüşümler verirken, yüksek uçuculu bitümlü kömürlerin en yüksek dönüşümü verdiği gözlenmiştir (Ateşok, 2009b).

Kömürler, %5 ile %40 arasında inorganik madde veya mineral madde içermektedirler. Mineral maddenin bileşenlerini; alümino silikatlar, silika (kuvars), karbonatlar (Ca, Mg ve Fe içeren karbonatlar), sülfürler (pirit ve markazit) oluşturmaktadır. Kömür içindeki mineral madde, özellikle düşük dereceli kömürlerde, karboksil grubuna bağlı olarak bulunabilmektedir. Mineral maddenin, özellikle hidrojen basıncı altında yapılan kömür sıvılaştırma işlemlerinde katalizör görevi yaptığı bilinmektedir. Mineral madde içeriği arttıkça, dönüşüm de artmaktadır. Ayrıca, linyitlerdeki kül miktarının artışıyla birlikte, toplam dönüşümün, toluen ve hekzanda çözünebilir ürünlerin arttığı; kül içindeki Fe, Al, Mg, Na ve K içeriklerinin toplam dönüşümü ve sıvı ürün miktarını arttırdığı bilinmektedir (Ateşok, 2009b).

Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan temel kimyasal maddeler; tetralin-C₁₀H₁₂ (Merck, %98 saflıkta) ve azot (N₂) gazı (Habaş, %99,99 saflıkta)'dır. Yardımcı kimyasal maddeler; hekzan-C₆H₁₄ (Riedel-de Haen, %95 saflıkta), toluen-C₇H₈ (Riedel-de Haen, %99,7 saflıkta) ve tetrahidrofuran-C₄H₈O (Merck, %99,0 saflıkta)'dır. Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan ana çözücülerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan çözücülerin fiziksel özellikleri

Çözücü adı	Formül	Molekül ağırlığı	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Kaynama noktası (°C)
Tetralin	C ₁₀ H ₁₂	132	-31	0,973	206
Tetrahidrofuran	C ₄ H ₈ O	72	-65	0,888	65
Hekzan	C ₆ H ₁₄	86	-94	0,659	69
Toluen	C ₇ H ₈	92	-95	0,866	110,8

2.7. Kaynak Özetleri

Piroliz çalışmaları;

Ceylan (1991), Elbistan linyitinin modifiye Fisher retortu ile, azot gazının atmosferik basıncı altında, 220°C, 260°C, 300°C, 360°C, 420°C, 480°C, 530°C ve 600°C sıcaklıklarda piroliz özelliklerini araştırmıştır. Semi-kok, katran ve gaz ürünlerin verimlerini, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelemiştir. Sıvı ürün çıkışının 220°C civarında meydana geldiğini, 300°C civarında maksimum olduğunu, gaz ürün çıkışının ise 500°C'den sonra meydana geldiğini ve artan sıcaklıkla birlikte arttığını belirlemiştir. Yüksek sıcaklıklarda elde edilen katranın, düşük sıcaklıklarda elde edilen katrandan daha viskoz olduğu ve daha uzun zincirli parafinler, aromatikler ve heteroaromatikleri içerdiği sonucuna varmıştır.

Önal vd. (1995), İstanbul Yeniköy linyitlerinden semi-kok ve gaz yakıt üretimini teknolojik ve ekonomik açıdan incelemiştir. Yarı koklaştırma deneylerinde -3 mm boyutlu 105 °C'de kurutulmuş linyit örneğini kullanmışlardır. Deneylerde değişik parametrelerin etkisini incelemişler ve optimum sıcaklığı 550°C, koklaştırma süresini ise 15 dakika olarak belirlemiştir. Bu şartlarda, %35 nem, kuru baza göre %32,93 kül, %2,15 toplam kükürt, %35 uçucu madde içeren ve üst ısı değeri 3920 kcal/kg olan kömürden; %0 nem, %22 kül, %1,59 toplam kükürt ve %0,5 yanabilir kükürt, %15 uçucu madde içeren ve üst ısı değeri 6000 kcal/kg olan, semi-kok elde edilebileceğini görmüşlerdir.

Asmatülü vd. (1996), İstanbul Yeniköy linyitlerine düşük sıcaklık karbonizasyonu uygulayarak, hava kirliliği açısından sorun yaratmayacak semi-kok elde etme olanaklarını araştırmışlardır. Yaptıkları düşük sıcaklık karbonizasyonu deneylerinde sıcaklık, tane boyutu ve sürenin koklaştırma üzerine etkilerini incelemiştir. Karbonizasyon deneylerinde en önemli parametrenin sıcaklık olduğunu (650°C) ve koklaşma süresinin ise 50-76 dakika arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Karbonizasyon sonucunda kömürün ortalama olarak yanabilir kükürt içeriğinin %1,05'den %0,4'e, uçucu madde içeriğinin %46,57'den %15,24'e düştüğünü, sabit karbon içeriğinin ise %35,89'dan %68,09'a yükseldiğini görmüşlerdir. Düşük sıcaklık karbonizasyonu uygulanması ile kömürden nem ve hava kirliliği yaratan uçucu madde ve kükürt uzaklaştırılabilmesine karşılık; elde edilen semi-kok taneciklerinin dayanıksız olduğundan, bu semi-kokların briketlenmesinin daha uygun olacağı sonucuna varmışlardır.

Kök vd. (1998), Çayırhan linyitinin tane boyutunun kömür pirolizi üzerine etkisini TG/DTG ile incelemiştir. Tüm deneyleri 50 ml/dk azot akışında, 10°C/dk ısıtma hızıyla, 20-600°C sıcaklık aralığında izotermal olmayan şartlar altında yapmışlardır. Deneylerin sonucunda tane boyutu azaldıkça; pik sıcaklıklarında gözle görülür bir artış olduğunu, sabit karbon yüzdesinin azaldığını fakat buna karşılık kül yüzdesinin arttığını görmüşlerdir. Tane boyutu azaldıkça, maksimum ağırlık kaybının daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğini

belirlemişlerdir. Tüm tane boyutları için, iki farklı bölgeye sahip olan TG/DTG eğrilerinin benzer eğilimler gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Güldoğan vd. (2000), Tunçbilek linyitinin pirolizinde ısıtma hızının, katı ürün verimi ve piroliz kinetikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneyleri izotermal olmayan şartlarda, argon atmosferinde, 10-80 K/dk ısıtma hızında ve 298-1173 K sıcaklık aralığında yapmışlardır. Her ne kadar farklı ısıtma hızlarındaki linyit örneklerinin TG/DTG eğrileri bazı farklılıklar içermiş olsa da, termogravimetrik eğrilerin 673 K'den 873 K'e kadar olan kısımları için, ortalama göreceli uçucu madde ürünlerini, toplam ağırlığın %40,7'si olarak hesaplamışlardır. Aynı deney şartlarında ısıtma hızının, uçucu madde verimi üzerine neredeyse hiç etki etmediğini görmüşlerdir. Artan ısıtma hızıyla birlikte, toplam dönüşümde ufak bir artış (veya semi-kok üründe ufak bir azalma) meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Hayashi vd. (2000), Japonya Yallourn linyitini HCl ile demineralize ettikten sonra hem yavaş ısıtma hızıyla (0,167 K/sn), hem de hızlı ısıtma hızıyla ($2-3 \times 10^3$ K/sn) piroliz ederek çar, katran ve gaz verimleri üzerine ısıtma hızının etkisini araştırmışlardır. Isıtma hızının katran, CO, CO₂ ve hidrokarbon gaz ürünleri üzerine önemli bir etkisinin olmadığını, fakat hızlı piroliz sonucu elde edilen çarın, alifatik karbon içeriğinin ve H₂O veriminin azaldığını belirlemişlerdir.

Güldoğan vd. (2001a), Mengen linyitini atmosferik basınçta piroliz ederek ısıtma hızının ve tane boyutunun, katı ürün verimi ve piroliz kinetikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyleri izotermal olmayan şartlarda, 42 ml/dk argon akışında, 10-90 K/dk ısıtma hızında ve 298-1173 K sıcaklık aralığında, -125+63 µm ve -63+44 µm olmak üzere iki farklı tane boyutu kullanarak yapmışlardır. Genel olarak tüm TG/DTG eğrilerinde 3 bölge izlemişlerdir. Göreceli uçucu madde verimini -125+63 µm boyut için toplam uçucu madde veriminin yaklaşık %45'i, -63+44 µm boyut için ise yaklaşık %40'ı olarak hesaplamışlardır. Aynı deney şartlarında ısıtma hızının, uçucu madde verimi üzerine neredeyse hiç etki etmediğini görmüşlerdir. Artan ısıtma hızıyla birlikte DTG piklerinin aşamalı olarak arttığını, semi-kok veriminin -125+63 µm tane boyutu için değişmediğini, fakat -63+44 µm tane boyutu için ise önemsiz miktarda azaldığını belirlemişlerdir.

Güldoğan vd. (2001b), Mengen linyiti, Denizli turbası ve değişik oranlardaki linyit-turba karışımlarının pirolizini atmosferik basınçta, izotermal olmayan şartlarda, 42 ml/dk argon akışında, 30 K/dk ısıtma hızı ve 293-1173 K sıcaklık aralığında yapmışlardır. Mengen linyiti için göreceli uçucu madde verimini toplam uçucu madde veriminin yaklaşık %39,1'i ve maksimum pik sıcaklığını 704 K, Denizli turbası için ise göreceli uçucu madde verimini toplam uçucu madde veriminin yaklaşık %66'sı ve maksimum pik sıcaklığını ise 614 K olarak hesaplamışlardır. Aynı şartlar altında piroliz edilen 20:80, 40:60, 60:40 ve 80:20 oranlarında karıştırılan linyit-turba örneklerinde karışımdaki turba yüzdesinin artmasıyla birlikte, ağırlık kayıplarının, göreceli uçucu

madde verimlerinin ve toplam dönüşüm yüzdelерinin arttığını fakat buna karşılık semi-kok verimlerinin azaldığını belirlemişlerdir.

Ballice (2002), Soma linyiti ve Şırnak asfaltiti örneklerinin piroliz boyunca davranışlarını belirlemek için, sabit yataklı reaktörde 2 K/dk ısıtma hızında, 90 ml/dk argon akış hızıyla piroliz deneylerini gerçekleştirmiştir. Piroliz ürünlerini GC-MS ile belirlemiştir. Piroliz deneylerinin sonucunda linyit ve asfaltit için maksimum uçucu çıkış sıcaklığını, en yüksek pik sıcaklığı olan 430°C olarak kaydetmiştir. Hem linyit hem de asfaltitin pirolizinde her bir sıcaklıkta n-parafinlerin oranının olefinlerden daha yüksek olduğunu görmüştür. Piroliz sonucu linyitin asfaltite göre, daha fazla n-parafin (C₁-C₄, C₅-C₉, C₁₀-C₁₅, C₁₆₊) ve katı artıktaki daha fazla karbon içerdiğini, buna karşılık asfalten ve preasfalten gibi yüksek moleküllü hidrokarbonların miktarının ise daha az olduğunu belirlemiştir.

Çelik (2002), Türkiye'nin farklı bölgelerinden aldığı düşük ranklı kömür örneklerini 3 mm'nin altına indirdikten sonra, -3+1 mm, -1+0,1 mm ve -0,1 mm olmak üzere farklı boyut gruplarına ayırmıştır. Daha sonra 10 cm çaplı bir silindirik retort kullanarak, 15 dakika boyunca 500-600°C'de düşük sıcaklık karbonizasyonuna maruz bırakarak ağırlık kaybı, uçucu madde, toplam kükürt içeriği ve boyut analiz ölçümlerini yapmıştır. Düşük sıcaklık karbonizasyonu sonucunda 300°C'nin altındaki sıcaklıklarda kükürt uzaklaşmasının olmadığını, 300 °C'de kükürt uzaklaşmasının görülmeye başladığını ve 450°C'ye kadar hızla arttığını ve 600°C civarında ise maksimuma ulaştığını belirlemiştir. Semi-kok ürünün performansını daha da arttırmak için 0,1 mm'nin altındaki boyut hariç (beslemenin yaklaşık %5'i), diğer boyutlarda kuru manyetik ayırma yapmıştır. Optimum şartlarda yaptığı manyetik ayırma testleri ile, ara üründe toplam kükürt uzaklaşmasının beslemeye göre yaklaşık %35 daha fazla olduğunu, organik kükürt miktarlarının da önemli ölçüde azaldığını, özellikle organik kükürdün önemli bir kısmının kömürde bulunan demire bağlandığını belirlemiştir. 550°C'de gerçekleştirilen düşük sıcaklık karbonizasyonu sonucu %35 nem, %32,93 kül, %2,15 toplam kükürt içeren, üst ısı değeri 3920 kcal/kg olan kömür örneğinden; minimum nem, %22 kül, %15 uçucu madde, %1,59 toplam kükürt ve %0,5 organik kükürt içeren 6000 kcal/kg üst ısı değerli briket kömürü elde etmiştir.

Ekinci vd. (2002), Soma, Mengen, Bolluca ve Seyitömer linyitlerinin hem su buharı etkisinde hem de azot akışında sıvı ürün karakterizasyonunu belirlemek amacıyla pirolizini çalışmışlardır. Piroliz deneylerini 10°C/dk ısıtma hızıyla final sıcaklık 800°C'de 2 saat bekleterek yapmışlardır. Hegzanda çözünmeyenleri asfaltenler olarak, çözünenleri ise hegzan, toluen ve etanol-toluen (1:1) kullanarak silika jel kromatografisiyle alifatik, aromatik ve polar kısımlara ayırmışlardır. Alifatik ve aromatik kısımların kompozisyonunu GC ve GC-MS ile belirlemişlerdir. Tüm kömürler için buhar pirolizinden elde edilen sıvı ürünün alifatik ve aromatik

bileşen verimlerinin, azot pirolizinden elde edilenlerden daha yüksek, buna karşılık asfaltan ve polar bileşen verimlerinin ise daha düşük olduğunu belirlemişlerdir.

Güldoğan vd. (2002), Gediz linyit örneğinin semi-kok verimi ve piroliz kinetikleri üzerine, ısıtma hızı ve tanecik boyutunun etkilerini incelemişlerdir. Deneyleri $-595+297\ \mu\text{m}$ ve $-53+44\ \mu\text{m}$ olmak üzere iki farklı tanecik boyutunda, izotermal olmayan şartlarda, 42 ml/dk argon akışında, 10-90 K/dk ısıtma hızı aralığında, 298 K'den 1173 K'e kadar yapmışlardır. Göreceli uçucu madde verimini (termogravimetrik eğrilerin 678 K'den 777 K'e kadar olan doğrusal kısımları için) $-595+297\ \mu\text{m}$ boyut için toplam uçucu madde veriminin yaklaşık %41'i, $-53+44\ \mu\text{m}$ boyut için ise yaklaşık %39'u olarak hesaplamışlardır. Deneylerin sonucunda maksimum uçucu giderme hızı pik değerlerinin, belirli bir parça boyut aralığında ısıtma hızının artmasıyla birlikte arttığını gözlemişlerdir. Isıtma hızı arttıkça, her iki tane boyutunda da semi-kok verimlerinin azaldığını belirlemişlerdir.

Sinağ (2004), 2-3 mm'nin altına öğütülmüş Soma Işıklar linyit örneklerinin pirolizini, 400°C, 450°C, 500°C ve 550°C gibi 4 farklı sabit sıcaklıkta, 20 ml/dk azot akış hızında, hem inert ortamda hem de 0,5 ml/dk su buharı atmosferinde gerçekleştirerek, semi-kok ürün verimlerini incelemiştir. Semi-kok ürünlerin, piroliz atmosferi ve piroliz sıcaklığı tarafından etkilendiğini görmüştür. Artan sıcaklıkla birlikte katı ürün reaktivitesinin de arttığını ve aynı sıcaklıklarda buhar pirolizindeki dönüşümün, inert ortamdakine göre daha yüksek olduğunu belirlemiştir.

Canel vd. (2004), Tunçbilek linyitini 3,5 ml/dk nitrojen akışında, 3 K/dk ısıtma hızıyla, 0,5, 5 ve 10 MPa basınçlarda, 20-950 °C sıcaklık aralığında 20 dk bekleterek piroliz etmişlerdir. Piroliz ürünlerine (katran ve toplam gaz) sıcaklık ve nitrojen basıncının etkilerini araştırmışlardır. Basıncın 0,5 MPa'dan 5 MPa'a artmasıyla beraber katran ve toplam gaz veriminin azaldığını, fakat 10 MPa'ın üzerine çıkıldığında ise tekrar arttığını belirlemişlerdir. Bu durumun sebebinin, yoğunlaşmanın önlenmesi (kok oluşumu) ve radikallerin stabilizasyonu olduğunu düşünmüşlerdir. Artan basınçla birlikte katran oluşum hızının azaldığını tespit etmişlerdir.

Baruah ve Khare (2007), Hindistan Meghalaya ve Nagaland'dan aldıkları yüksek kükürt içerikli kömürleri 20 ml/dk helyum akışında, 6°C/dk ısıtma hızında, 450°C, 600°C, 850°C ve 1000°C sıcaklıklarda, 15, 25, 35 ve 60 dakika piroliz etmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda elde ettikleri semi-kok, katran ve gaz ürünlerin S, CH₄, H₂S ve SO₂ içeriklerini incelemişlerdir. H/C atomik oranının artmasıyla semi-kok ürün veriminin de arttığını, 850°C'ye kadar katran ürün veriminin azalma eğiliminde olduğunu, gaz ürün veriminin ise değişmediğini belirlemişlerdir. Sıcaklık arttıkça semi-kok ürünün kükürt içeriğinin azaldığını, buna karşılık CH₄ ve H₂S içeriklerinin arttığını, SO₂ içeriğinin ise sıcaklık ile bağımsız olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Piroliz boyunca 850°C'nin üzerinde temel sülfür gazı olarak H₂S, daha düşük konsantrasyonlarda ise SO₂ çıkışını belirlemişlerdir. CH₄ yayılımının artan sıcaklıkla birlikte arttığını görmüşlerdir.

Bentli vd. (2010), ev yakıtı olarak kullanılan Tunçbilek linyit kömürlerinden dumansız yakıt elde edebilmek amacıyla, semi-kok deneyleri yapmışlardır. Tüvenan, 1,5 g/cm³'de yıkanmış linyit ile 500°C'de elde ettikleri semi-kokun kl, karbon ve uçucu madde oranlarını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri semi-kokların ısıl değerleri ve katran verimlerinin iyi olmasına rağmen, sağlam bir semi-kok elde edilemediğini görmüşlerdir. Sıcak briketleme ve Form-kok yöntemlerinin test edilmesiyle, dumansız yakıt üretmek amacıyla mit verici çalışmaların yapılabileceğini söylemişlerdir.

Saydut vd. (2010), Hazro linyit kömürünü etüvde 105 C'de kuruttuktan sonra, -0,60+0,25 mm boyut aralığındaki 50 g örnek ile 40C/dk ısıtma hızında 400C, 450C, 500C, 550C, 600C, 700C ve 800 C sıcaklıklarda sabit yatakta piroliz deneyleri yapmışlardır. Kömürü maksimum sıcaklıkta 180 dakika bekletmişler ve çıkan ürünlerin verimlerini hesaplamışlardır. Piroliz sıcaklığının gaz, sıvı ve katı ürünlerin dağılımında dominant bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte katı ürün veriminde azalma, gaz ve hafif yağların veriminde ise bir artış tespit etmişlerdir. Optimum piroliz sıcaklığını 550C olarak belirlemişlerdir. Bu sıcaklıkta katı ürün verimini %67,68, yağ ürün verimini %13,28 ve toplam dönüşümü %32,32 olarak hesaplamışlardır. Pentanda znebiyen kısmın (yağ) kolon kromatografisinin sonucunda %18,43 alifatik, %12,08 aromatik ve %8,72 polar alt fraksiyonlarından oluştuğunu belirlemişlerdir.

Uzun ve zdoğan (2011), Elbistan linyitini 250 m'nin altına indirdikten sonra, tüvenan örneğin 450 C'de kapalı kuvars kroze de 7 dakika uçucu maddesini gidermişlerdir. Daha sonra elde edilen katı kalıntı ile HF ve HCl kullanarak demineralize ettikleri linyit örneklerinin, 50 ml/dk hava akışında, 10 K/dk ısıtma hızıyla 1200C'ye kadar TGA ve DTA ile pirolizini yapmışlardır. Sabit karbonun orijinal linyitte %7,06, 450C'deki semi-kok üründe %7, demineralize örnekten ise %44,52; uçucu maddenin orijinal linyitte %48,39, katı kalıntıda %43,42, demineralize örnekten %53,44; kl içeriğinin ise orijinal linyitte %44,55, katı kalıntıda %49,58, demineralize örnekten ise %2,04 olduğunu belirlemişlerdir.

Sert vd. (2011), Soma Eynez linyitini 0,1 mm'nin altına indirdikten sonra, 80 ml/dk azot akışında 450C, 500C, 550C, 600C ve 650 C'lerde ham ve demineralize örneklerle piroliz deneyleri yapmışlardır. rnekleri demineralize etmek için HF, HNO₃ ve HCl kullanmışlar ve elde edilen ürünlerin verimlerini karşılaştırmışlardır. Kl içeriklerini ham linyitte %14,6, HCl ile demineralize örnekten %1,23, HNO₃ ile demineralize örnekten %1,10 ve HF ile demineralize örnekten ise %1,06 olarak hesaplamışlardır. Uçucu hidrokarbon kazanımlarının tüm örneklerde sıcaklıkla birlikte arttığını, karbon içeriklerinin ise azaldığını belirlemişlerdir. HCl ile inorganik kısımların uzaklaştırılması ile uçucu hidrokarbon kazanımının azaldığını belirlemişlerdir. HNO₃

ile inorganik elementlerin uzaklaştırılmasının, piroliz reaksiyonlarında dönüşümü azalttığını, buna karşılık HF ile demineralizasyonun dönüşümü arttırdığını tespit etmişlerdir.

Jan vd. (2011), Pakistan'ın iki farklı bölgesinden aldıkları kömür örneklerini 85 meş'in altına indirdikten sonra 40 ml/dk azot akışında, 500°C-800°C sıcaklık aralığında, ham ve HCl ile demineralize örneklerle piroliz deneyleri yapmışlardır. Demineralizasyondan sonra her iki kömür örneği için de karbon içeriklerinin arttığını, mineral içeriklerinin ise (O, Na, Ca, Fe, Mg ve S) azaldığını belirlemişlerdir. Ham ve demineralize örneklerle yaptıkları deneylerin sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünlerin verimlerinin, demineralize olmuş örneklerde önemli oranda arttığını belirlemişlerdir.

Haykırı-Açma vd. (2012), Elbistan linyitinin pirolizini hem yatay fırında hem de termal analiz metoduyla çalışmışlardır. Önce linyiti, uçucu kısmını uzaklaştırmak için 100 ml/dk azot akışında, 10°C/dk ısıtma hızıyla 900°C'ye kadar düzenli olarak artan sıcaklıklarda termal analizörde yakmışlardır. Sonra bu pirolitik semi-kok örneklerini yatay fırında 300°C, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C sıcaklıklarda, 100 ml/dk azot akışında, 10-40°/dk ısıtma hızıyla, 1 saat bekleterek piroliz etmişlerdir. Pirolitik semi-kokun izotermal olmayan yanma prosesi süresince termal reaktivitesini incelemek amacıyla kalorifik değer, kısa analiz, elementel analiz, yüzey alanı ve ortalama çap gibi parametreleri göz önüne almışlardır. Piroliz sıcaklığı arttıkça pirolitik semi-kokun C içeriğinin ve buna bağlı olarak kalorifik değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Uçucu madde çıkışının artmasıyla, reaktivitenin azalmasına bağlı olarak C içeriğinin arttığını, final sıcaklığının artmasıyla da oluşan semi-kokun yanma reaktivitesinin önemli ölçüde azaldığını belirlemişlerdir.

Shi vd. (2012), Çin'in Dongshen linyitini TGA kullanarak 60 ml/dk azot akışında, 10°C/dk, 15°C/dk, 20°C/dk ve 25°C/dk ısıtma hızlarında 600°C'ye kadar piroliz etmişler ve piroliz ürünlerini incelemişlerdir. Artan sıcaklıkla birlikte, semi-kokun kül, sabit karbon içeriği ve kalorifik değerinin arttığını, buna karşılık uçucu içeriğinin azaldığını görmüşlerdir. Elde edilen katran ürünün aromatikler ve oksijence zengin bileşiklerden oluştuğunu belirlemişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla beraber gaz ürünün H₂ ve CO gaz içeriklerinin arttığını, CH₄ ve CO₂'nin ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Mo vd. (2012), Moğolistan linyitlerinin bağlayıcısız sıcak briketlenmiş örneklerini piroliz etmiş, oluşan semi-kok, katran ve gaz ürünlerin karakterizasyonunu çalışmışlardır. Piroliz deneylerini 10°C/dk ve 15°C/dk ısıtma hızlarıyla, 900°C sıcaklıkta 90 dakika bekleterek gerçekleştirmişlerdir. Artan sıcaklıkla birlikte semi-kokun kül ve sabit karbon içeriğinin arttığını, buna karşılık uçucu içeriğinin azaldığını görmüşlerdir. Piroliz sıcaklığı arttıkça semi-kokun H/C oranının ve O içeriğinin ve ürün veriminin açık bir şekilde azaldığını, fakat düşme dayanımı ve basınç dayanımının arttığını belirlemişlerdir. Düşük sıcaklık semi-kokunun SEM görüntülerinde

bal peteğine benzediğini, fakat sıcaklığın artmasıyla bu yapının büyük gözenekler ve çatlaklara dönüştüğünü görmüşlerdir. 400°C-900°C sıcaklık aralığında sıvı ürünün su içeriğini %12,45-19,35, toplam katran verimini %2,38-3,39, hafif yağ içeriğini %0,9-1,27 ve ağır yağ içeriğini ise %1,47-1,79 aralığında hesaplamışlardır. En yüksek katran verimini %3,39 ile 550°C’de belirlemişlerdir. Gaz ürün veriminin ise piroliz sıcaklığına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterdiğini (%4,45-22,9) tespit etmişlerdir.

Wei vd. (2012), Çin Dongrong kömürünü oksijensiz atmosferde farklı parametreleri inceleyerek piroliz etmişlerdir. Birinci aşama deneylerde ısıtma hızını 3°C/dk ve piroliz süresini 90 dakikada sabit tutarak 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C ve 700°C sıcaklıklarda; ikinci aşama deneylerde piroliz sıcaklığını 550°C’de ve piroliz süresini 90 dakikada sabit tutarak 3°C/dk, 7°C/dk ve 12°C/dk ısıtma hızlarında; son aşama deneylerde ise ısıtma hızını 3°C/dk, piroliz sıcaklığını ise 550°C’de sabit tutarak 90 dakika ve 180 dakika piroliz sürelerinde çalışmışlardır. Tüm bu çalışmalar sonucunda elde ettikleri katı ürünlerin kısa analizlerini yapmış ve kalorifik değerlerini hesaplamışlardır. Piroliz sıcaklığı arttıkça; semi-kok ürünün ve uçucu maddenin azalmasına karşılık, kül içeriğinin ve kalorifik değerlerinin arttığını görmüşlerdir. Isıtma hızı arttıkça; semi-kok ürünün verimi (%74,23-74,62), uçucu madde (%10,46-12,12), kül (%12,12-12,40) ve kalorifik değerlerde (34,02-34,40 MJ/kg) önemli bir farklılık belirlememişlerdir. Piroliz süresi arttıkça semi-kok ürünün ve uçucu maddenin azalmasına karşılık, kül içeriğinin ve kalorifik değerlerinin önemsiz oranda arttığını görmüşlerdir. Deneylerin sonucunda optimum piroliz sıcaklığını 450°C, ısıtma hızını 3°C/dk ve piroliz süresini ise 90 dakika olarak belirlemişlerdir.

Jayaraman vd. (2013), yüksek kül içerikli Türk ve Hindistan kömürlerinin argon, hava, oksijen ve buhar gibi çeşitli ortamlarda, 35 K/dk ve 45 K/dk ısıtma hızlarında ve 25°C-1250°C sıcaklık aralığında TGA ile pirolizi sonucu, yanma ve gazlaşma özelliklerini incelemişlerdir. Argon ortamında maksimum kütle kaybının, temelde O₂, CO₂, CO, H₂ ve az miktarda CH₄ olmak üzere 350-700°C aralığında olduğunu görmüşlerdir. 800°C’nin üzerinde kömür parçacıklarının dekompoze olmuş buharla reaksiyona girerek CO₂, CO ve H₂ oluşturduğunu, yaklaşık 950°C’de ise ekzotermik reaksiyonların tamamlandığını belirlemişlerdir. Tutuşma sıcaklığı ve maksimum kütle kaybı sıcaklığının her iki kömür için de yaklaşık aynı olduğunu, buna karşılık Hindistan kömürünün daha yüksek yanma sıcaklığına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki kömür örneği için de gazlaştırma prosesinin yaklaşık 700°C civarında başladığı ve 950°C civarında ise kömürün tamamının yandığını izlemişlerdir. Kömürün termal bozunması sırasında temelde CO, CO₂, H₂ ve CH₄ gazı çıkışlarını belirlemişlerdir.

Xu vd. (2013), Çin Neimen linyit örneklerini 50 ml/dk argon akışında, 10°C/dk ısıtma hızında, oda sıcaklığından 600°C’ye kadar piroliz etmişler ve çıkan gaz ürün verimini

incelemişlerdir. Piroliz sıcaklığı arttıkça, gaz ürün türlerinde bir artış belirlemişlerdir. Maksimum CO₂ verimini 410°C-440°C, CO verimini 485°C-515°C, C₂H₄ ve C₂H₆ verimini ise 535°C-565°C sıcaklık aralığında tespit etmişlerdir. Düşük moleküllü ağır hidrokarbonların veriminin, yüksek moleküllü olanlardan daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Meng vd. (2013), Çin ve Endonezya'dan almış oldukları iki linyit örneğinin düşük sıcaklık (350°C-750°C) pirolizinden elde edilen katı ürünün (semi-kok) karakterizasyonunu incelemişlerdir. İzotermal olmayan TGA ile, katı ürünün reaktivitesinin 450°C'den daha düşük sıcaklıklarda, yüksek sıcaklıklardakine göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Endonezya linyitinin, Çin linyitinden daha yüksek ağırlık kaybı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Yüzey analizi sonuçlarına göre, yüksek sıcaklık katı ürününün düşük sıcaklıktakinden daha büyük yüzey alanına sahip olduğunu görmüşlerdir. Artan sıcaklıkla birlikte katı ürün verimlerinin azaldığını (Çin kömüründe 450°C'de %74, Endonezya kömüründe 400°C'de %65), her iki kömür içinde katran verimi ve gaz ürün veriminin arttığını belirlemişlerdir. Çin kömürünün semi-kok ve katran verimlerinin, Endonezya kömüründen daha yüksek olduğunu hesaplamışlardır.

Sert vd. (2014), Soma Eynez linyitinin yapısında bulunan minerallerin, izotermal piroliz ürünleri ve ürün kompozisyonu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Linyiti hem ham halde, hem de HCl, HNO₃ ve HF ile demineralize ettikten sonra izotermal piroliz reaktöründe 450°C, 500°C, 550°C, 600°C ve 650°C sıcaklıklarda, 80 ml/dk azot akışında piroliz etmişlerdir. Piroliz sonrası oluşan ürünlerin verimlerini kapiler gaz kromatografi cihazında hesaplamışlardır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte toplam hidrokarbon dönüşümünün, sıvı ve gaz ürün veriminin arttığını buna karşılık katı ürün veriminin azaldığını belirlemişlerdir. Ham linyitten elde ettikleri uçucu ürün verimlerini demineralize edilen örneklerle karşılaştırmışlardır. Organik yapıdan karbonatların uzaklaştırılmasıyla (HCl ile muamele) uçucu hidrokarbon dönüşümünün ham numuneye oranla azaldığını, piritin uzaklaştırılmasıyla (HNO₃ ile muamele) dönüşümün önemsiz oranda azaldığını, silikatların uzaklaştırılmasıyla (HF ile muamele) ise dönüşümde yaklaşık %13'lük bir artış olduğunu belirlemişlerdir.

Onay vd. (2015), Çayırhan linyitinin hızlı pirolizi sonrasında elde edilen ürünlerin verimlerini incelemişlerdir. Katı ürünü yüksek yoğunluklu kuru manyetik ayırma ile zenginleştirerek, kül ve kükürt değişimlerini belirlemişlerdir. Hızlı piroliz deneylerini sabit yataklı bir reaktörde, 5 cm³/dk azot akışında iki set halinde yapmışlardır. İlk grup deneylerde kömür örneğini 350°C/dk ısıtma hızıyla, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C final sıcaklıklarda 10 dakika bekletmişlerdir. İkinci grup deneyleri ise oda sıcaklığından 500°C'ye kadar 100°C/dk, 350°C/dk ve 800°C/dk ısıtma hızlarıyla yapmışlardır. Hızlı piroliz deneylerinde en yüksek sıvı ürün verimini %17,58 ile 350°C/dk ısıtma hızıyla 500°C piroliz sıcaklığında elde etmişlerdir. Bu sıcaklıkta katı ürün verimini %59,21 ve kükürt giderimini %17,24 olarak hesaplamışlardır.

Pirolizden elde ettikleri katı ürünün kül ve kükürt içeriğini azaltmak amacıyla, yüksek alan şiddetli katı manyetik ayırma deneyleri yapmışlardır. Belirledikleri optimum koşullarda yaptıkları bu deneylerden sonra katı ürünün kül oranı %51,96'dan %46,72'ye inerken, kükürt içeriklerinde bir azalma olmadığını belirlemişlerdir. Elde ettikleri sıvı ürünün %15,97 aromatiklerden, %34,82 aromatik-alken gruplardan ve %49,21 alifatiklerden oluştuğunu tespit etmişlerdir.

He vd. (2015), Çin Shengli linyitlerinin piroliz özelliklerini 5°C/dk ısıtma hızıyla, 50 ml/dk helyum akışında ve oda sıcaklığından 1200°C'ye kadar araştırmışlardır. Piroliz sonucu elde ettikleri uçucu ürünün GS-MS analizlerini yapmışlardır. Uçucu ürünlerin çoğunlukla benzen, alifatik hidrokarbon, naftalin, benzofuran, indan, indol ve bifenilden oluştuğunu belirlemişlerdir.

Sıvılaştırma çalışmaları;

Bayraktar ve Özkaplan (1985), Beypazarı, Elbistan ve Kangal linyitlerini bomba tipi reaktörde, tetralin eşliğinde ve katalizörsüz, 395°C sıcaklık ve 7MPa soğuk hidrojen basıncı altında 17 dakika hidrojenlemişlerdir. Çar ürünün dönüşümünü, sıvı verimini ve preasfalten-asfalten-yağ dağılımlarını saptamışlardır. En optimum sonuçları, dönüşüm ve sıvı verimi için Beypazarı örneğinde bulmuşlardır. En yüksek sıvı seçiciliğini Beypazarı, en ince sıvıyı ise Elbistan örneğinde görmüşlerdir. Buna karşılık sıvıların kükürt içeriklerinin çok yüksek (Beypazarı için %4,2, Elbistan için %6,1) olduğunu belirlemişlerdir.

Gözmen vd. (2002), yüksek kükürt içerikli Gediz ve Çayırhan kömürünün katalizörlü ve katalizörsüz ortamlarda, 6,9 MPa basınç altında sıvılaştırma özelliklerini incelemişlerdir. Maksimum dönüşümü ve maksimum yağ+gaz verimini; amonyum heptamolibdat (AHM) katalizörü ve tetralin varlığında, 450°C sıcaklıkta elde etmişlerdir. Gediz kömürü için maksimum dönüşümü %98 ve yağ+gaz verimini %70; Çayırhan linyiti için ise maksimum dönüşümü %85 ve yağ+gaz verimini ise %70,5 olarak hesaplamışlardır. Tüm şartlarda Gediz linyitindeki toplam dönüşümün Çayırhan linyitinden daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. AHM katalizör ön bileşiğinin kullanımı ile kükürt içeriğinin Çayırhan yağ ürününde %0,1'den daha az, Gediz linyitinde ise %1'den daha az olduğunu görmüşlerdir.

Hesenov vd. (2004), Çayırhan linyiti, Kangal linyiti ve İzmir Tüpraş rafinerisinden aldıkları petrol ağır kesimlerinin farklı oranlardaki karışımlarını 400°C, 425°C ve 450°C sıcaklıklarda sıvılaştırarak genel ürün dağılımlarını incelemişlerdir. En yüksek dönüşümü Çayırhan linyiti ve petrol karışımında, en yüksek yağ verimini kömür ve petrolün 1:3 oranında karıştırılmasıyla ve 425°C sıcaklıkta yaptıkları deneyde elde etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen yağların GC-MS analizlerini yaparak, içeriklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte yakıt içerisindeki alkan yapılarının azaldığını belirlemişlerdir.

Gül vd. (2004), Bolu Mengen ve Sivas Kangal kömürlerinin çözücülü (tetralin) ve çözücüsüz ortamlarda, amonyum tetratimolibdat varlığında, 400°C ve 450°C de sıvılaştırma deneylerini gerçekleştirerek ürün dağılımlarını incelemişlerdir. Sıvılaştırma sırasında çözücü olarak tetralin kullanıldığında yağ+gaz, asfaltin ve preasfaltin oluşumunun daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Yıldız vd. (2006), Elbistan linyiti ve çeşitli biyokütle türlerinin (atık plastik, atık kağıt, atık çamur ve melas) ayrı ayrı ve birlikte inert atmosfer ve katalitik/katalitik olmayan koşullardaki sıvılaşma verimleri üzerine tanecik boyutu, katalizör türü, sıvı/katı oranı, reaksiyon süresi, reaksiyon sıcaklığı ve geri kazanılan çözücü etkisini araştırmışlardır. Sıvılaştırma çalışmalarını hem katalitik hem de katalitik olmayan koşullarda 20 atm azot gazı basıncında, 400 rpm karıştırma hızı ile, sıvı/katı oranını 1/1-9/1, reaksiyon sıcaklığını 350-425°C, reaksiyon süresini 30-150 dk aralığında gerçekleştirmişlerdir. Sıvılaştırma sonucu elde edilen çar ürünlerin toplam dönüşüm değerlerini hesaplamışlardır. Elbistan linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması üzerine, tanecik boyutunun önemli bir etkisinin olmadığını belirlemiş ve toplam dönüşümü %79 olarak hesaplamışlardır.

Karaca ve Koyunoğlu (2010a), Elbistan linyiti ve çeşitli biyokütlelerin (atık plastik, atık kağıt, atık çamur ve melas) ayrı ayrı ve birlikte inert ortamda, katalitik ve katalitik olmayan koşullardaki sıvılaşma verimleri üzerine tanecik boyutu, katalizör türü, biyokütle türü, sıvı-katı oranı, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Deneylerin sonucunda Elbistan linyitinin inert atmosfer ve katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılmasında, tanecik boyutunun toplam dönüşüm üzerine önemli bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. Katalitik olmayan koşullarda toplam dönüşümü %79, katalitik koşullarda ise %92 olarak hesaplamışlardır. Bundan dolayı, deneylere katalizör varlığında devam etme kararı vermişlerdir.

Karaca ve Koyunoğlu (2010b), Elbistan linyiti ve çeşitli biyokütlelerin (atık plastik, atık kağıt, atık çamur ve melas) ayrı ayrı ve birlikte katalitik ve katalitik olmayan koşullar altında azot gazı ortamında sıvılaşma deneyleri yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda optimum tane boyutunu 1,5 mm, katı/sıvı oranını 3/1, reaksiyon süresini 90 dakika ve reaksiyon sıcaklığını ise 400° C olarak belirlemişlerdir. Her koşulda elde edilen çar ürünlerin elementel analiz sonuçlarında belirgin bir farklılık belirlememişlerdir. Buna göre, çar ürünün düşük karbon (%15) ve yüksek oksijen (%80) içerdiğinden dolayı yakıt olarak kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varmışlardır. Sıvılaştırma işlemi sonucu elde edilen yağ ürünlerin analizini GC-MS ile yapmışlardır. GC-MS analizi sonuçlarına göre elde edilen yağın temelde naftalin ve türevleri, tetralin ve türevleri, bütillenmiş-hidroksitoluen, binaftalen ve indol gibi bileşenlerden oluştuğunu belirlemişlerdir.

Rahman vd. (2015), Kanada Bienfait linyitinin 4 MPa hidrojen basıncında, 4°C/dk ısıtma hızıyla, 350°C-450°C sıcaklık aralığında, 2/1 çözücü/kömür oranında ve 30 dakika süreyle sıvılaştırma deneylerini yapmışlar ve sıvılaştırma şartlarının elde edilen sıvı ürün kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kömür sıvısındaki H/C oranı azaldıkça ve 350°C sıcaklıkta reaksiyon süresi arttıkça, kömürün sıvı kalitesinin de azaldığını, maksimum sıvılaştırma sıcaklığı arttıkça sıvı ürünün daha yüksek yoğunluklu ve daha fazla aromatik bileşenlere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, artan sıcaklık ve reaksiyon süresiyle birlikte kömür sıvısındaki azot içeren bileşenlerin konsantrasyonunun da arttığını gözlemişlerdir.

Kanca vd. (2016), Tunçbilek linyitinin hem pirolizini hem de sıvılaştırmasını çalışmışlardır. Piroliz deneylerini kesikli bir reaktörde 200 cm³/dk azot akışında, 5 K/dk ısıtma hızıyla, 40°C-800°C sıcaklık aralığında; sıvılaştırma deneylerini ise 50 cm³/dk H₂-N₂ karışımında, ve diğer şartları aynı tutarak gerçekleştirmişlerdir. Sıvılaştırma katısının piroliz katısına oranla daha az alifatik bileşenlerden oluştuğunu belirlemişlerdir. Ham linyitte %5,4 olan kükürt içeriğinin piroliz sonucunda elde ettikleri katı ve sıvı ürünlerde %3,9'a, sıvılaştırma deneyleri sonucu elde ettikleri katı ve sıvı ürünlerde ise %0,5'e azaldığını tespit etmişlerdir. Piroliz sonucunda temel gaz ürünlerin CH₄, H₂ ve CO₂ olduğunu belirlemişlerdir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Tez çalışmasında kullanılan tüm linyitlerin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla, boyut, kısa kömür, elementel, XRD, petrografik, FTIR ve DTA-TGA analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tüm örneklerin yüzey nemi ASTM D1412'ye göre, oda sıcaklığında sabit tartıma gelene kadar bekletilerek hesaplanmıştır. Bünye rutubeti içeriği ASTM D3173'e göre, 0,25 mm'nin altına öğütülmüş havada kuru kömür numunesinin, sıcaklığı iyi kontrol edilebilen ve içinde kuru hava sirkülasyonu olan bir etüvde 104-110°C'de, 1 saat süreyle bekletildikten sonra, uğradığı ağırlık kaybından yararlanılarak saptanmıştır. Kül analizi ASTM D3174'e göre, 0,25 mm'nin altına öğütülmüş 1 g'lık kömür numunesinin, yavaş yavaş 700-750°C'ye çıkarılan hava sirkülasyonlu bir fırında ısıtılarak, ağırlığı sabit kalana kadar ($\pm 0,001$ g) bekletilmesiyle yapılmıştır. Kül miktarı, kalan kütlenin tartılması sonucu saptanmıştır. Uçucu madde içeriği ASTM D3175'e göre, 1 g'lık kömür numunesinin kapaklı bir platin krozede, dikey bir boru fırında 950 $\pm$ 20°C'de 7 dakika tutulduktan sonra uğradığı ağırlık kaybından saptanmıştır (Ek 1). Kömür örneklerinin sabit karbon içerikleri ise; nem, kül ve uçucu madde içerikleri toplamının 100'den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Toplam kükürt miktarı elementel analiz yönteminde kullanılan LECO marka CHNS-932 cihazıyla, kalorifik değeri ise IKA C1 marka kalorimetre bombasıyla belirlenmiştir.

XRD, FTIR ve elementel analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde (İBTAM), termal analizler (DTA-TGA) ise İnönü Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarında yaptırılmıştır.

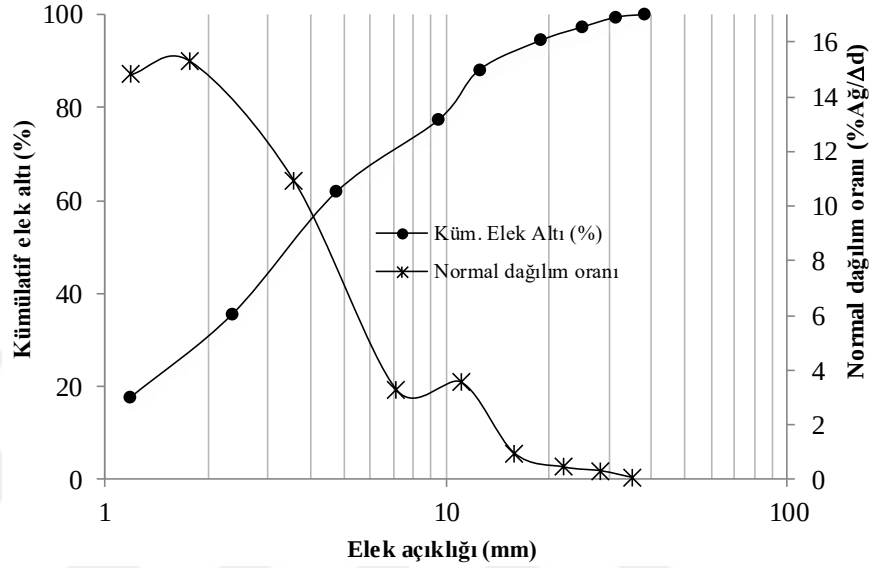
XRD analizi için Rigaku D Max 2B cihazı, FTIR analizi için Varian 1000 FT-IR cihazı ve termal karakteristiklerini belirlemek amacıyla da SHIMADZU Differential Thermal Analyser DTA-50 ve SHIMADZU Thermogravimetric Analyser TGA-50 model cihazlar kullanılmıştır.

Linyitlerin maseral ve mikrolitotip bileşenlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen petrografik dağılım analizi Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü'nde yaptırılmıştır.

3.1.1. Malatya Arguvan linyiti

Tez çalışmasında kullanılan Arguvan linyiti, yeraltından çıkarılan kömürün boşaltıldığı silo çıkışından belirli periyotlarla yeterli miktarda alındıktan sonra 750 kg'a kadar indirilmiştir. Daha sonra numune azaltma yöntemleriyle laboratuvar çalışmaları kapsamında kullanılacak temsili örnekler 2'şer kg'lık poşetlerde saklanmıştır.

Linyit örneğinin orijinal bazda elek analizi sonuçları Şekil 3.1 ve Ek 2’de verilmiştir. Şekil 3.1 incelendiğinde orijinal baza göre, Arguvan linyitinin %80’inin 10 mm’nin, normal dağılım oranı grafiğine göre ise örneklerin büyük oranda 19 mm boyutunun altında olduğu belirlenmiştir. Ortalama tane boyutu ise 6,1 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. Orijinal bazda Arguvan linyitinin elek analizi

Arguvan linyitinin havada kuru bazda gerçekleştirilen elementel analiz sonuçlarına göre %31,80 C, %3,54 H, %0,66 N ve %3,88 S içerdiği belirlenmiştir. ASTM standartları ile belirlenen havada kuru baz analiz değerlerine göre hesaplanan orijinal, kuru ve kuru-külsüz baz değerleri Çizelge 3.1 ve Ek 3’de verilmiştir.

Nem oranı, linyitin kömürleşme derecesini gösteren, kalitesini ve kullanımını etkileyen en önemli özelliktir. Bu bakımdan, linyit sınıflandırılmasında, orijinal nem oranı birinci derecede etkili olmaktadır. Orijinal nem oranı göz önünde tutularak yapılan dış görünüş linyit sınıflamasına göre, %22,67 nem içeren Arguvan linyiti sert linyit sınıfına girmektedir. Sert linyitler parça sağlamlığı ve yıkanabilirliklerinin nispeten iyi olmasıyla bilinmektedirler (Kemal ve Arslan, 2010).

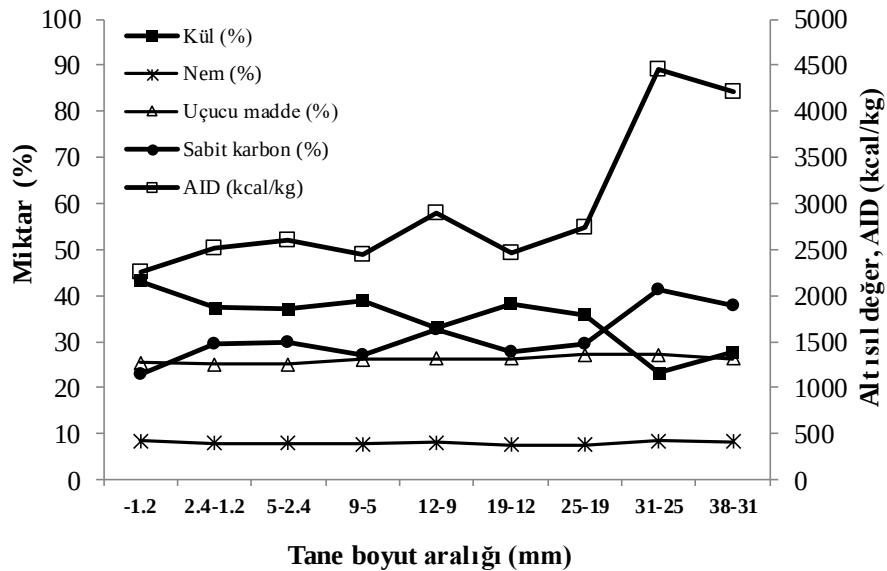
Arguvan linyitinin diğer bir karakteristik özelliği de havada kuru bazda %37,77 gibi yüksek oranda küle sahip olmasıdır. Normalde sert linyitlerde bu kadar yüksek oranda kül içeriği beklenen bir durum değildir. Kuru-külsüz kömür bazında %47,28 uçucu madde içeren Arguvan linyiti, Riediger katı yakıt sınıflamasına göre de sert linyit sınıfına girmektedir (Kemal ve Arslan, 2010).

Çizelge 3.1. Arguvan linyitinin kısa analiz sonuçları

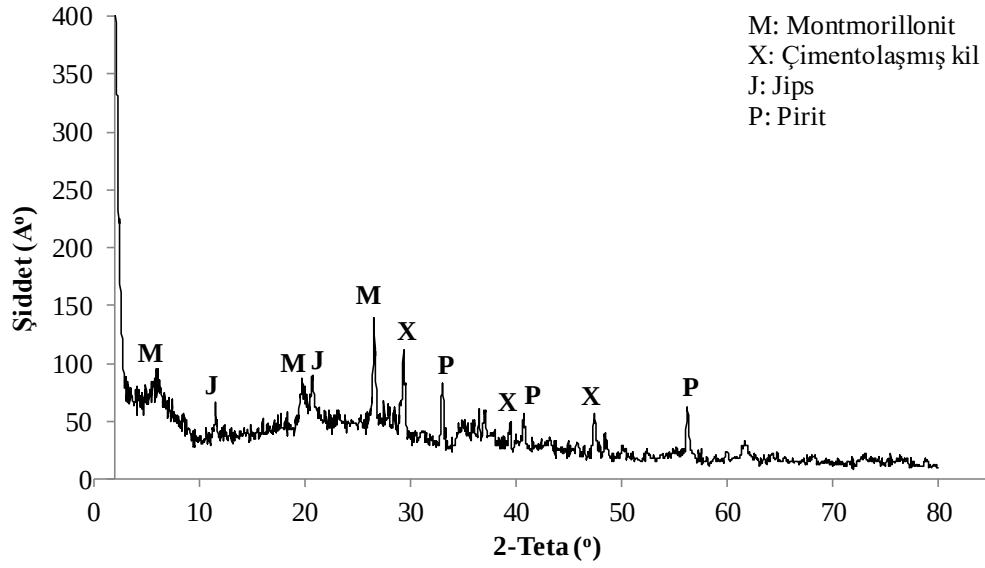
İçerik	Orijinal baz	Havada kuru baz	Kuru baz	Kuru-külsüz baz
Kaba nem (%)	15,98	-	-	-
Nem (%)	22,67	7,96	-	-
Kül (%)	31,73	37,77	41,04	-
Uçucu madde (%)	21,56	25,66	27,88	47,28
Sabit C* (%)	24,04	28,61	31,08	52,72
Toplam S (%)	3,23	3,85	4,18	-
AID (kcal/kg)	2068	2576	2851	4747

* Fark ile

Havada kuru baza göre gerçekleştirilmiş olan Arguvan linyitinin tane boyutuna göre kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon değişimleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.2 incelendiğinde, Arguvan linyitinde uçucu madde ve nem içeriği tane boyutuna bağlı olarak hemen hemen hiç değişmezken, kül ve sabit karbon içeriklerinde anlamlı bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. 19 mm’den iri malzeme miktarı sadece %5,5’dir. Dolayısıyla tane boyutu değişimine göre içeriklerde belirgin bir farklılık olmadığı belirlenmiştir. Ancak tane boyutuna bağlı olarak kalorifik değerleri, beklendiği gibi kül içeriği ile ters orantılı olarak değişmiştir. ASTM sınıflamasına göre, kuru-külsüz bazda üst ısııl değeri 4795 kcal/kg olan Arguvan linyiti Alt bitümlü-C sınıfına dahildir (Çizelge 2.2).



Şekil 3.2. Havada kuru baza göre Arguvan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi



Şekil 3.3. Arguvan linyitinin XRD analiz sonucu

Arguvan linyit örneğinin XRD analizi sonucu incelendiğinde (Şekil 3.3), heterojen linyit yapısı içerisinde belirgin olarak kil minerallerinden montmorillonit ($\text{Al}_4\text{SiO}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pirit (FeS_2) ve çimentolaşmış kil minerallerine ait piklere rastlanmıştır.

Havada kuru bazda %37,77 kül içeriğine sahip olan Arguvan linyitinin Ankara MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yaptırılan petrografik analiz sonuçlarına göre;

- Maseral ve mineral dağılımına bakıldığında; hacimce maseral dağılımının %59 vitrinit (hüminit), %7 eksinit (liptinit) ve %6 inertinit grubundan; mineral dağılımının ise %6 framboidal pirit ve %22 diğer mineral maddelerden oluştuğu belirlenmiştir.
- Mikrolitotip dağılımında ise; %31 klarit, %21 duroklarit, %12 vitrit, %29 karbominerit ve %7 diğer mikrolitotipler bulunmaktadır. Buna göre %15 monomaseralik, %34 bimaseralik, %22 trimaseralik ve %29 karbominerit gruplarından oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar Abakay Temel ve Majumder'in (2016) çalışmalarıyla iyi uyumludur.

Kömürleşme başlangıcında bitkilerin hava ile teması, su altında kalma şartları, jelleşme durumu, ortamın asidikliği, bakteri ve mantarlaşıma durumlarına göre, kömürün yapıtaşları olan maseraller oluşmaktadır. Kurak ve sıcak ortamlarda veya zamanlarda inertinit gruplarının ve nemli atmosfer ortamlarında da vitrinit gruplarının oluştuğu düşünülmektedir (Kemal ve Arslan, 2010). Arguvan linyitinde %59 vitrinit (hüminit) grubu maseralin bulunması oluşum ortamının yağışlı olduğuna işaret etmektedir. Koklaştırma açısından vitrinit grubu önemli bir maseral grubudur. Kömürlerde vitrinit grubunun uçucu madde oranının %19-35 (kuru-külsüz bazda)

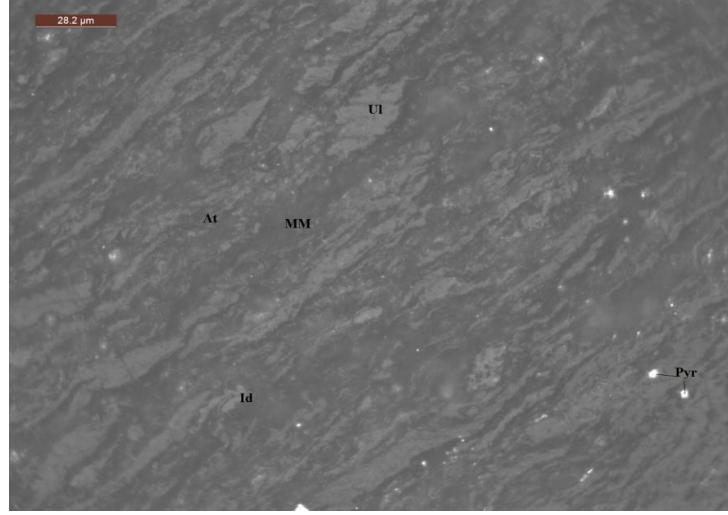
olması istenmektedir. Arguvan linyitinin kuru-külsüz bazda %47,3 uçucu madde içermesinden dolayı koklaşma ürününün parça değil de toz halinde çıkması beklenen bir durumdur.

Kömürlerde genellikle %5-10 arasında bulunan eksinit grubu, Arguvan linyitinde beklendiği gibi %7 oranındadır. Bu miktar esasen koklaştırma sırasında plastikleşme için yeterli sayılabilecek derecededir. Eksinit grubu maseraller, hidrojen zengin yüksek uçucu madde içerdiklerinden dolayı çoğunlukla katran ve gaz ürün olarak alınmaktadır.

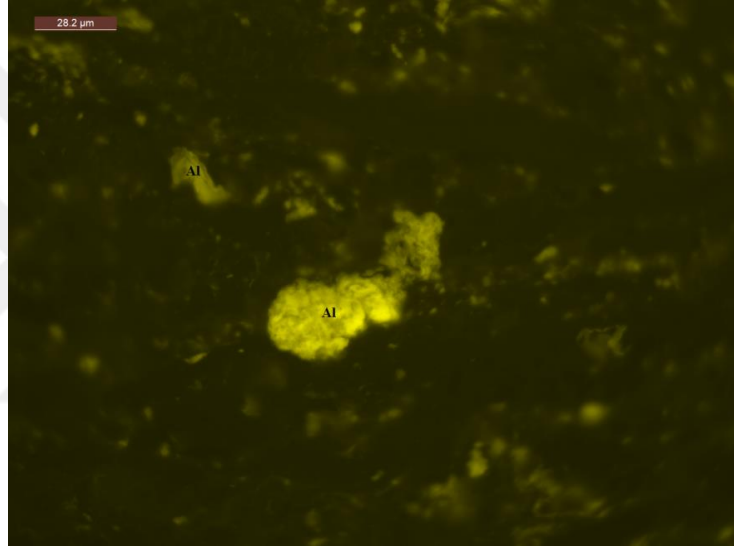
Arguvan linyitinde %6 oranında bulunan inertinit grubu maserallerin miktarının az olması ve oksitlenme ürünü olduklarından dolayı koklaştırmada herhangi bir etkilerinin olmayacağı düşünülmektedir. İntertinit grubu maseraller, termik parçalanma sonucu sadece katran ve gaz ürünleri vermektedir.

Arguvan linyitinin petrografik analizinde en önemli bulgulardan biri de pirit ile birlikte mineral madde miktarının hacimce %28 olmasıdır. Bu da linyitin gravite ve flotasyon zenginleştirmesinin zor olacağına işaret etmektedir. Şekil 3.4’de Arguvan linyitinin ince kesit resimlerinden görüldüğü gibi, linyitin içerdiği safsızlıkların (kil, kireçtaşı vb.) çok ince dağılımlı olması, bunların oluşumlarının kömürleşme esnasında (sinjenetik) meydana geldiğini göstermektedir. Önemli bir bulgu olarak zenginleştirme yöntemlerinin tamamında %24 külün altına inilememesinin nedenlerinden biri de sinjenetik mineral madde içeriğidir.

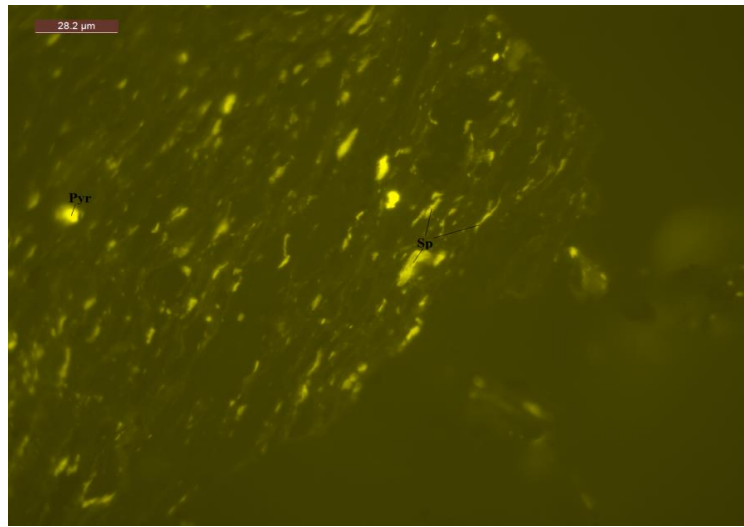
Şekil 3.4’de, önemli miktarda framboidal (küresel) piritin çok ince boyutta (yaklaşık 30 mikron altı) dağılım gösterdiği izlenmiştir. Buna göre gravite zenginleştirmesinde çalışma parametrelerinin önemli olacağı ortaya çıkmıştır. Gravite ayırımı sırasında birçok parametrede elde edilen %2 kükürt içeriğinin altına inilememesinin bir nedeni de linyitin bünyesinde piritin çok ince dağılım halinde bulunmasıdır. Arguvan linyitinin mikrolitotip analizinden elde edilen %29 karbominerit grubunun bulunması linyitle beraber yüksek miktarda mineral madde (kil, sülfür, karbonat, kuvars ve çeşitli mineraller) ve piritin bulunduğunu göstermektedir. Karbominerit miktarının yüksekliği, zenginleştirme ve koklaştırma yöntemlerinde istenen özelliklerin sağlanmasının zor olacağına işaret etmektedir.



(a)

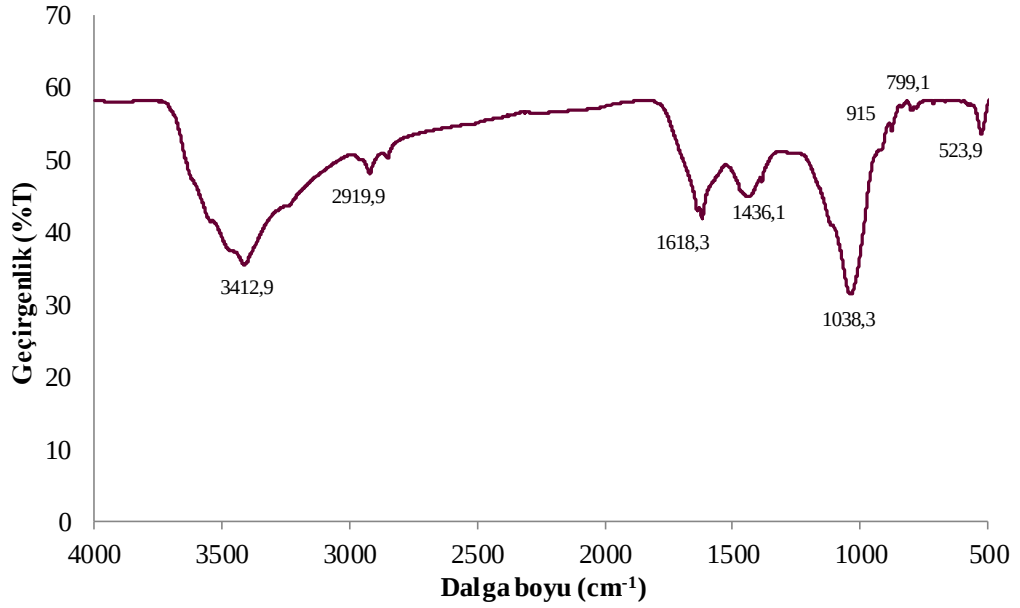


(b)



(c)

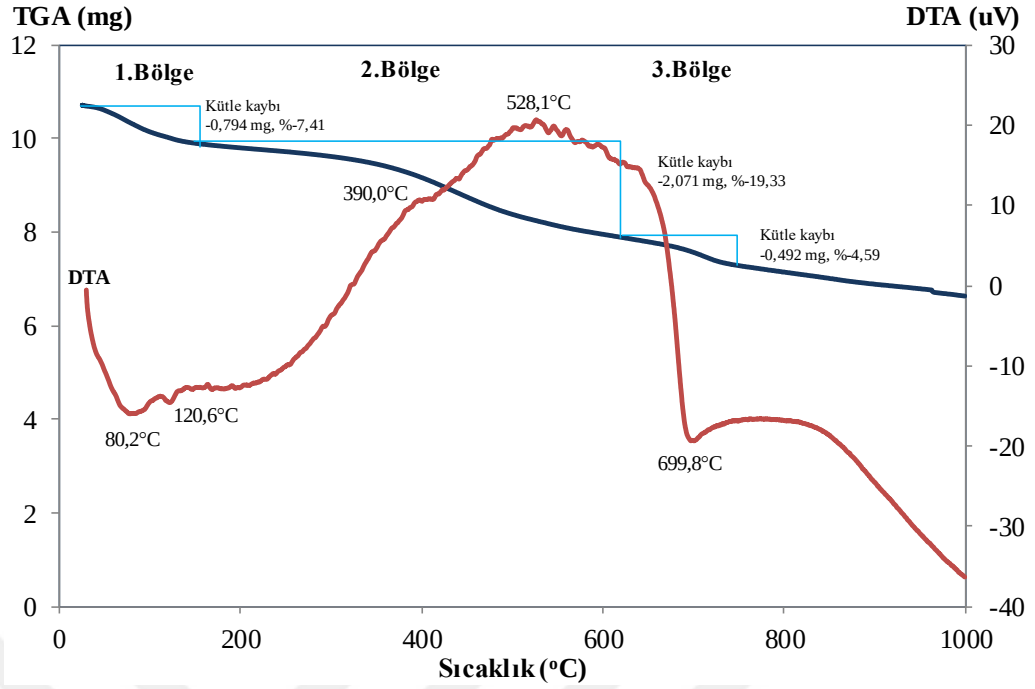
Şekil 3.4. Arguvan linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü (Ul: Ülminit, At: Atrinit, Id: İnertodetrinit, Pyr: Framboidal pirit, MM: Mineral madde, Sp: Sporinit, Al: Alginit)



Şekil 3.5. Arguvan linyitinin FTIR spektrumu

Yapısal analizi desteklemek ve fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla yapılan FTIR spekturumu Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekil 3.5’de yaklaşık 3413 cm^{-1} dalga boyunda görülen pik, sudaki hidroksil gruplarına ya da fenolik bileşiklere bağlı olarak ortaya çıkan tipik O-H gerilme pikidir. Alifatik yapının göstergesi olan ve hidrokarbon türlerine bağlı olarak ortaya çıkan C-H titreşim bandı ise 2920 cm^{-1} değerinde görülmektedir. 1618 cm^{-1} piki aromatik yapıdaki C=C ve C=O siklo olefin gerilmelerini, 1436 cm^{-1} pik yapı içerisindeki metal (Ca, Mg, Na, K) iyonlarına ait karboksilat gruplarını belirtmektedir. 1038 cm^{-1} civarındaki pik Si-O-Al/Fe/Mg vb. gerilmeleri, 915 cm^{-1} ve 800 cm^{-1} piki C-H aromatik bileşenlerine ait yapıları göstermektedir. (Lievens vd. 2013; Özbayoğlu vd. 2009; Elbeyli ve Pişkin, 2006; Silverstein vd. 1981).

Arguvan linyitinin termodinamik davranışını anlayabilmek amacıyla hava ortamında yapılan termal gravimetrik (DTA-TGA) analiz değişim eğrileri Şekil 3.6’da gösterilmiştir. DTA eğrisi 3 belirgin bölgeye ayrılabilir. Yaklaşık 80°C ve 121°C’de görülen kaba nem ve bünye nemine bağlı olan pikler 1.bölgeyi, 390°C’de başlayan ve 528°C’ye kadar devam eden pik uçucu madde çıkışı olan 2.bölgeyi, sabit karbonun yanması soucu 528°C ve 700°C’ler arası ise 3.bölgeyi göstermektedir. TGA eğrisinden uçucu madde ve katranın çıktığı 2.bölge ve 3.Bölgede ağırlık kaybı yaklaşık olarak %23,92 olarak belirlenmiştir. Linyitin kısa analizinden hesaplanan uçucu madde miktarı %25,66 değeri ile DTA’dan hesaplanan %23,92 uçucu madde miktarının birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Arguvan linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

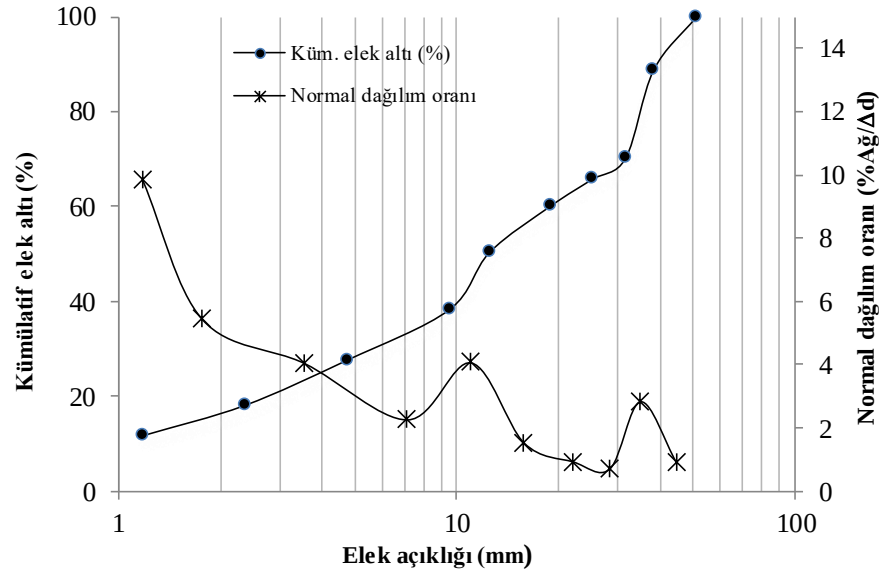
3.1.2. Sivas Kangal linyiti

Tez çalışmasında kullanılan Kangal linyiti draglaynın döküm basamağından ve ocak içinden muhtelif damarlardan belirli periyotlarla yeteri kadar alınmış ve daha sonra yaklaşık 800 kg'a indirilmiştir. Numune azaltma yöntemleriyle laboratuvar çalışmaları kapsamında kullanılacak temsili örnekler hazırlanmıştır.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında Kangal linyitinin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla, elek analizleri ve kısa analizleri gerçekleştirilmiştir. Linyit numunesinin orijinal baza göre gerçekleştirilen elek analiz sonuçları Şekil 3.7 ve Ek 2'de verilmiştir.

Şekil 3.7 incelendiğinde, orijinal baza göre Kangal linyitinin %80'inin 35 mm boyutunun altında olduğu, normal dağılım oranı grafiğine göre ise, linyit örneğinin tane boyutlarına göre yaklaşık eşit oranda dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Ortalama tane boyutu ise 18,1 mm olarak hesaplanmıştır.

Kangal linyitinin tüvenan havada kuru bazda gerçekleştirilen elementel analiz sonuçlarına göre; %22,81 C, %2,8 H, %0,36 N ve %2,95 S içerdiği belirlenmiştir. ASTM standartları ile belirlenen havada kuru baz analiz değerlerine göre hesaplanan orijinal, kuru ve kuru-külsüz baz değerleri Çizelge 3.2 ve Ek 3'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Orijinal bazda Kangal linyitinin elek analizi

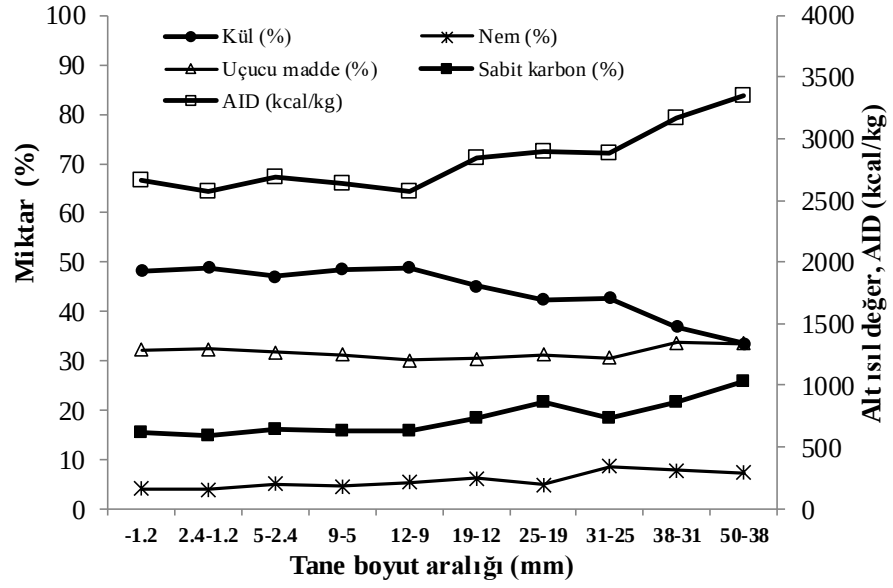
Çizelge 3.2. Kangal linyitinin kısa analiz sonuçları

İçerik	Orijinal baz	Havada kuru baz	Kuru baz	Kuru-külsüz baz
Kaba nem (%)	42,56	-	-	-
Nem (%)	45,91	5,83	0	-
Kül (%)	25,08	43,66	46,36	-
Uçucu madde (%)	18,03	31,91	33,89	63,18
Sabit C* (%)	10,68	18,60	19,75	36,82
Toplam S (%)	1,69	2,94	3,12	-
AID (kcal/kg)	1387	2860	3074	5662

* Fark ile

Orijinal nem oranı %45,91 olan Kangal linyiti yumuşak linyit sınıfına girmektedir. Ayrıca Kangal linyitinin orijinal bazda kaba nem miktarının %42,56 ve külünün %25,08 olması genç linyit olduğunun diğer göstergeleridir (Kemal ve Arslan, 2010). Kangal linyiti için hesaplanan baz değerleri literatür ile uyumludur (Toprak ve Yalçın Erik, 2011; Karayığit vd., 2001).

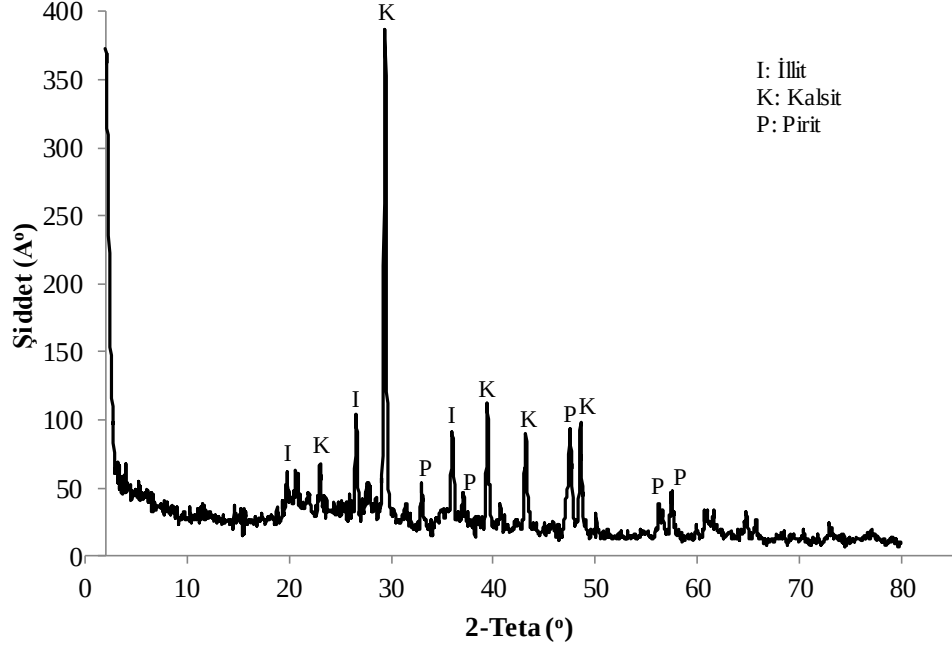
Uçucu madde miktarı kuru-külsüz kömür bazında %63,18 olan Kangal linyiti Riediger katı yakıt sınıflamasına göre yumuşak linyit sınıfına girmektedir (Kemal ve Arslan, 2010; Yalçın Erik, 2010). Havada kuru baza göre gerçekleştirilmiş olan Kangal linyitinin tane boyutuna göre kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon değişimleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Havada kuru baza göre Kangal linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi

Şekil 3.8 incelendiğinde, Kangal linyitinin tane boyutu azaldıkça kül içeriği artmakta ve buna bağlı olarak kalori değeri düşmektedir. Sabit karbon içeriği iri boyutlarda belirgin bir şekilde yükselmektedir. Nem içeriği ise tane boyutuna bağlı olarak önemli bir değişim göstermemektedir. Bu sonuçlara göre, tane boyutuna bağlı olarak bulunan kısa analiz sonuçları linyitlerde görülen genel karakteristik özellikleri içermektedir. ASTM sınıflamasına göre kuru-külsüz bazda üst ısı değeri 5697 kcal/kg olan Kangal linyiti, Alt bitümlü-B sınıfına dahildir (Çizelge 2.2).

Kangal linyit örneğinin XRD analizi sonucu (Şekil 3.9) incelendiğinde, linyit yapısında illit (kil minerali) (K , H_3O/H_2O) $Al_2[(OH)_2/AlSi_3O_{10}]$, kalsit ($CaCO_3$) ve pirit (FeS_2) minerallerine ait pikler belirlenmiştir. XRD sonuçları Karayiğit vd. (2001)'nin çalışmaları ile uyum içerisindedir.



Şekil 3.9. Kangal linyitinin XRD analiz sonucu

Havada kuru bazda %43,66 kül içeriğine sahip Kangal linyitinin Ankara MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yaptırılan petrografik analiz sonuçlarına göre;

- Maseral ve mineral dağılımına bakıldığında; hacimce maseral dağılımının %54 vitrinit (hüminit), %3 eksinit (liptinit) ve %2 inertinit grubundan; mineral dağılımının ise %3 framboidal pirit, %2 idiomorf pirit ve %36 diğer mineral maddelerden oluştuğu belirlenmiştir. Petrografi sonuçları, Toprak ve Yalçın Erik (2011) tarafından gerçekleştirilen Kangal kömürlerinin petrografik özellikleri ile çok benzerlik göstermektedir.
- Mikrolitotip dağılımında ise %29 duroklarit, %61 vitrinertit ve %5 karbominerit ve %5 diğer mikrolitotipler bulunmaktadır. Buna göre, %3 monomaseralik, %63 bimaseralik, %29 trimaseralik ve %5 karbominerit gruplarından oluştuğu tespit edilmiştir.

Kurak ve sıcak ortamlarda veya zamanlarda inertinit gruplarının ve nemli atmosfer ortamlarında da vitrinit gruplarının oluştuğu düşünülürse, Kangal linyitinde %54 vitrinit (hüminit) grubu maseralin bulunması oluşum ortamının yağışlı olduğunu göstermektedir. Koklaştırma açısından vitrinit grubu önemli bir maseral grubudur. Ancak vitrinit grubunun uçucu madde oranının %19-35 (kuru-külsüz bazda) olması koklaştırma açısından istenmektedir. Kangal linyitinin kuru-külsüz bazda %63,18 uçucu madde içermesinden dolayı koklaşma ürününün parça değil de toz halinde çıkması beklenen bir durumdur.

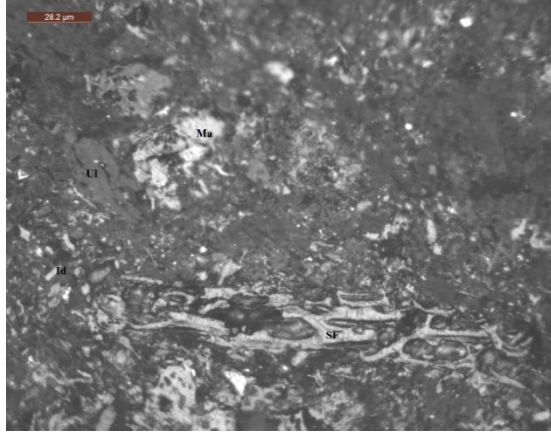
Kömürlerde genellikle %5-10 arasında bulunan eksinit grubu, Kangal linyitinde %3 oranında bulunmaktadır. Bu miktar esasen koklaştırma sırasında plastikleşme için yeterli değildir. Hidrojence zengin yüksek uçucu madde içerdiklerinden dolayı çoğunlukla katran ve gaz ürün olarak alınmaktadır.

Kangal linyitinde %2 oranında bulunan inertinit grubu maseraller, miktarın düşük olmasından dolayı sadece termik parçalanma sonucu katran ve gaz ürün veriminde etkilidir.

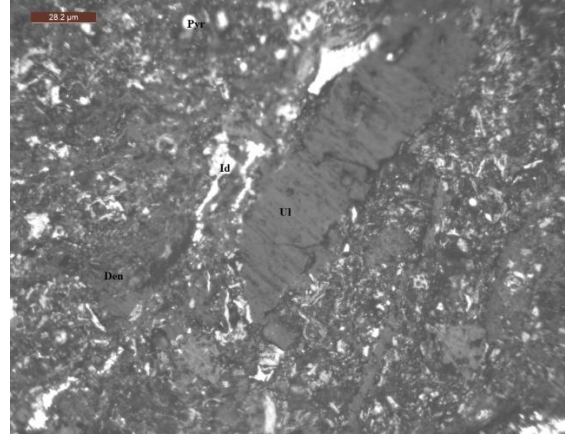
Kangal linyitinin petrografik analizinde önemli bulgulardan biri de pirit ile birlikte mineral madde miktarının hacimce %41 olmasıdır. Bu durum gravite ve flotasyon zenginleştirmesinin göreceli olarak zor olacağına işaret etmektedir. Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi Kangal linyitinde safsızlıkların (kil, kireçtaşı vb.) nispeten iri boyutlarda ve dolayısıyla oluşum açısından kömürleşmeden sonra (epijenetik) meydana geldiği görülmektedir. Önemli bir bulgu olarak zenginleştirme yöntemlerinin çoğunluğunda %43,7 külden %18-22 küle kadar uzaklaştırılması da mineral maddenin oluşumdan sonra kömüre karıştığının bir göstergesidir.

Kangal linyitinin ince kesit resimlerinde (Şekil 3.10) framboidal (küresel) piritin ince boyutta (yaklaşık 20 mikron altı) ve az miktarda dağılım gösterdiği izlenmiştir. Buna göre gravite zenginleştirmesinde çalışma parametrelerinin önemli olacağı sonucu çıkarılabilir. Gravite ayırımı sırasında birçok parametrede elde edilen %1-2,9 kükürt içeriği bu yargıyı doğrular niteliktedir.

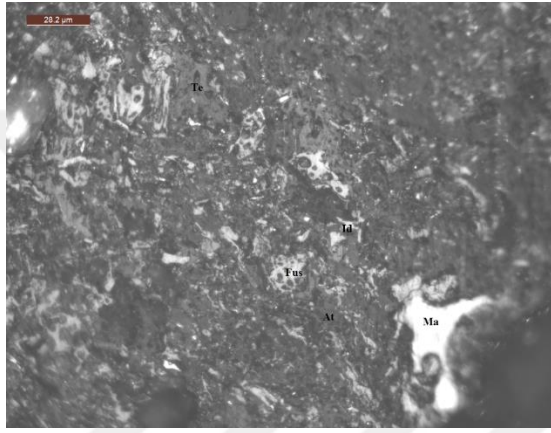
Kangal linyitinin mikrolitotip analizine göre %5 karbominerit grubunun bulunması, linyitle beraber yüksek miktarda mineral madde (sinjenetik/bünye külü) bulunmadığını belirtmektedir. Kömürle beraber karbominerit miktarının az oluşu göreceli olarak zenginleştirme ve koklaştırma yöntemlerinde istenen özelliklerin sağlanmasının mümkün olacağına işaret etmektedir. Buna karşılık %43,66 kül içermesi, kül yapıcı minerallerin ara kesmeden veya üretim sırasında yan kayaçtan geldiğini göstermektedir. Bu durum sahada numune temin ederken gözlenmiştir.



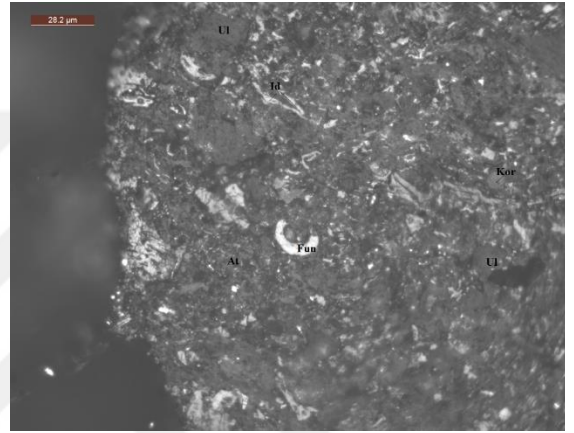
a)



b)



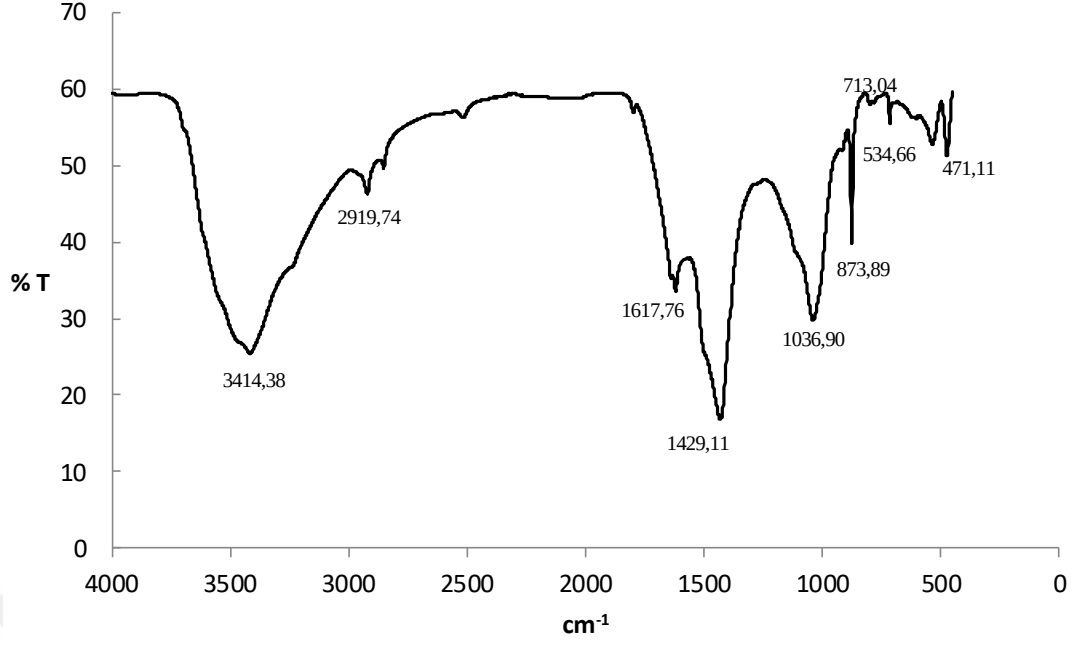
c)



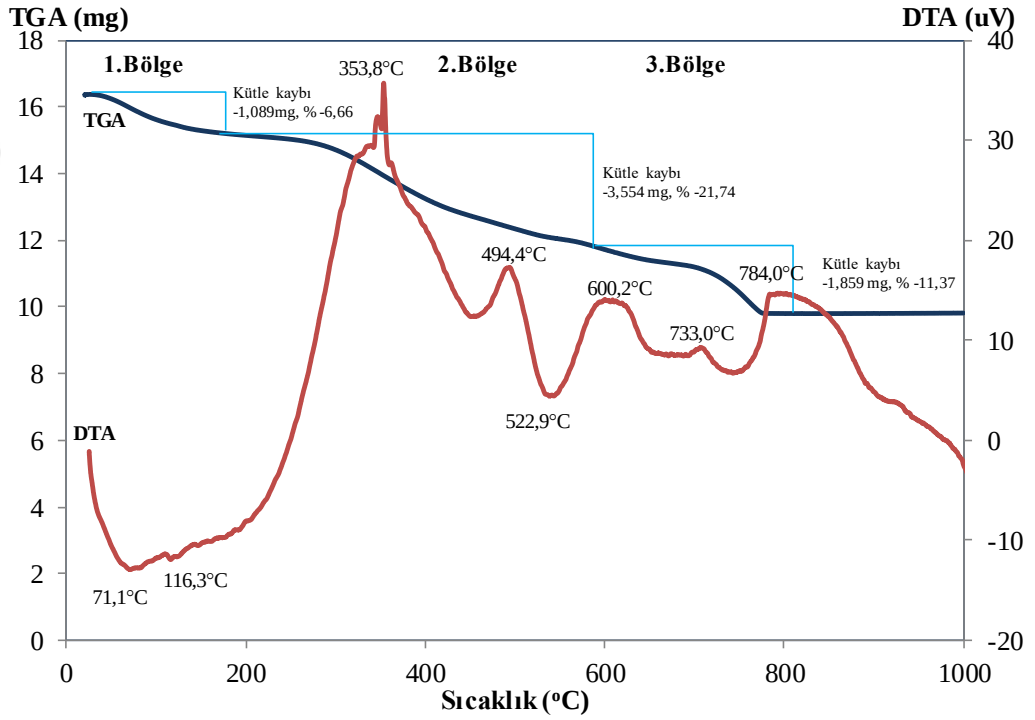
d)

Şekil 3.10. Kargal linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü (Ul: Ülminit, Ma: Makrinit, Sf: Semifüzinit, At: Atrinit, Id: İnertodetrinit, Den: Densinit, Fus: Füzinit, Ma: Makrinit, Te: Tekstinit, Pyr: Framboidal pirit, Sp: Sporinit, Al: Alginit, Kor: Korpohüminit, Fun: Funginit)

Şekil 3.11’de FTIR spektrumunda görülen yaklaşık 3414 cm^{-1} dalga boyunda görülen pik, sudaki hidroksil gruplarına ya da fenolik bileşiklere bağlı olarak ortaya çıkan O-H gerilme pikidir. Hidrokarbon türlerine bağlı olarak ortaya çıkan alifatik yapıyı gösteren C-H titreşim bandı ise 2920 cm^{-1} değerinde görülmektedir. 1618 cm^{-1} pikinin aromatik yapıdaki C=C ve C=O karbonil gerilmelerini; 1429 cm^{-1} pikinin yapı içerisindeki metal (Ca, Mg, Na, K) iyonlarına ait karboksilat gruplarını gösterdiği bilinmektedir (Lievens vd., 2013; Özbayoğlu vd., 2009; Feng vd. 2006). 1037 cm^{-1} civarı piki Si-O-Al/Fe/Mg vb. gerilmeleri; 874 cm^{-1} ve 713 cm^{-1} pikleri C-H aromatik bileşenlerine ait yapıları göstermektedir (Silverstein vd. 1981).



Şekil 3.11. Kangal linyitinin FTIR spektrumu



Şekil 3.12. Kangal linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

Kangal linyitinin termodinamik davranışını anlayabilmek amacıyla hava ortamında yapılan termal gravimetrik (DTA-TGA) analiz değişim eğrileri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Şekil 3.12’deki DTA eğrisi 3 bölgeye ayrıldığında; 1.bölgede yaklaşık 71°C ve 116°C’deki pikler kaba ve bünye neminin olduğu 1.bölgeyi, 354°C’de başlayıp 733°C’de sona eren uçucu madde çıkışı 2.bölgeyi, sabit karbonun yanması sonucu 600°C ve 733°C’ler arası ise 3.bölgeyi göstermektedir. Bu sonuçlar, Şensöğüt vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen DTA sonuçları ile uyum içerisindedir.

TGA eğrisinden katranın çıktığı 2.bölgede ağırlık kaybı %21,74 olarak belirlenmiştir. Yine piroliz deneylerinde elde edilen yaklaşık %18-19 sıvı ürün miktarıyla 2.Bölgedeki ağırlık kaybı birbiriyle uyumludur. Linyitin kısa analizinden hesaplanan uçucu madde miktarı %31,91 değeri ile DTA’dan 2.Bölge ve 3.Bölgenin toplamıyla hesaplanan %33,11 uçucu madde miktarının birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

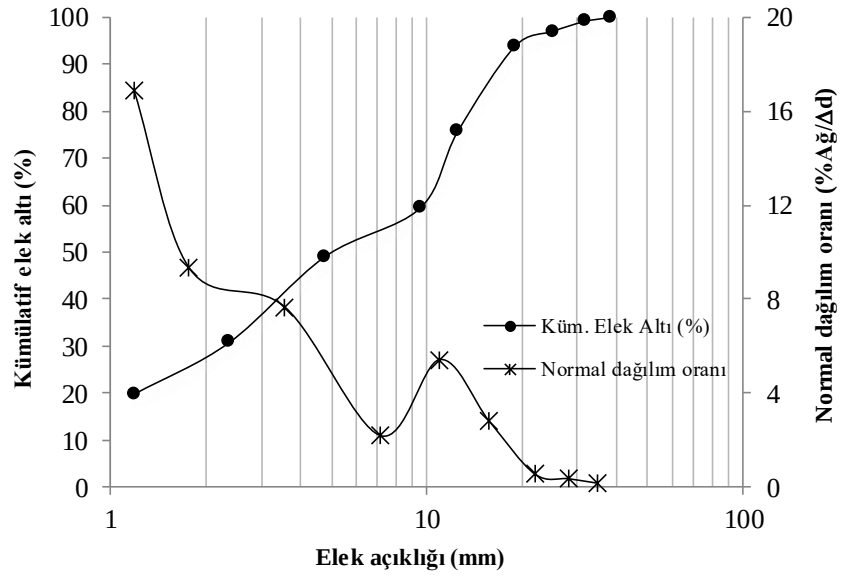
3.1.3. Kahramanmaraş Elbistan linyiti

Tez çalışmasında kullanılan Elbistan linyiti, hareketli bant konveyörün döküldüğü yerden belirli periyotlarla yeteri kadar alınmış ve sonra yaklaşık 750 kg’a kadar indirilmiştir. Numune azaltma yöntemleriyle laboratuvar çalışmaları kapsamında kullanılacak temsili örnekler hazırlanmıştır.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında Elbistan linyitinin karakteristik özelliklerini belirlemek amacıyla, elek analizleri ve kısa analizleri gerçekleştirilmiştir. Orijinal baza göre gerçekleştirilen elek analiz sonuçları Şekil 3.13 ve Ek 2’de verilmiştir.

Orijinal baza göre Elbistan linyitinin %80’inin 14 mm boyutunun altında, normal dağılım oranı grafiğine göre yine linyit örneğinin büyük oranda 20 mm’nin altında olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.13). Ortalama tane boyutu ise 7,94 mm olarak hesaplanmıştır.

Elbistan linyitinin havada kuru bazda gerçekleştirilen elementel analiz sonuçlarına göre; %18,51 C, %2,47 H, %0,3 N ve %2,74 S içerdiği belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Orijinal bazda Elbistan linyitinin elek analizi

ASTM standartları ile belirlenen havada kuru baz analiz değerlerine göre hesaplanan orijinal, kuru ve kuru-külsüz baz değerleri Çizelge 3.3 ve Ek 3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Elbistan linyitinin kısa analiz sonuçları

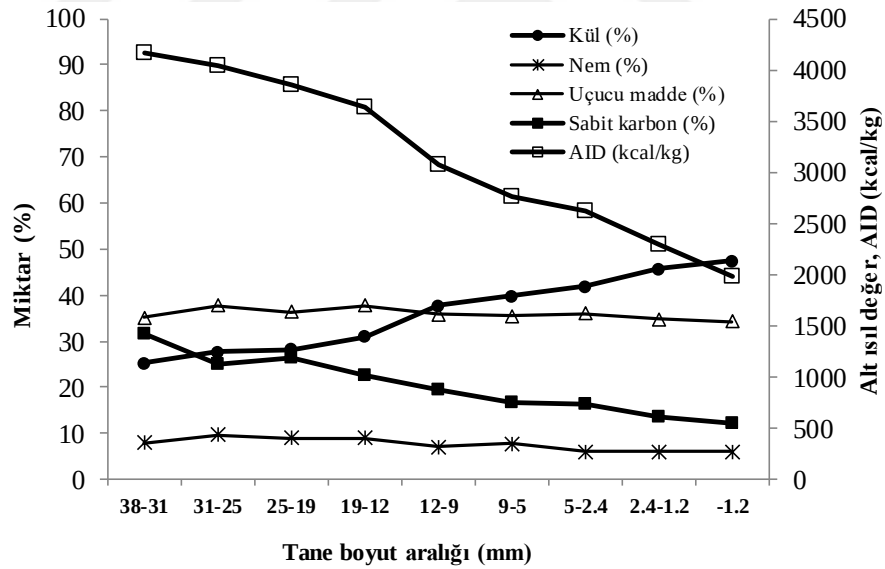
İçerik	Orijinal baz	Havada kuru baz	Kuru baz	Kuru-külsüz baz
Kaba nem (%)	46,72	-	-	-
Nem (%)	50,49	7,07	0	-
Kül (%)	21,13	39,65	42,67	-
Uçucu madde (%)	19,07	35,80	38,52	67,19
*Sabit C (%)	9,31	17,49	18,81	32,81
Toplam S (%)	1,45	2,72	2,93	-
AİD (kcal/kg)	1218	2813	3073	5280

* Fark ile

Orijinal nem oranı göz önünde tutularak yapılan dış görünüş linyit sınıflamasına göre, %50,49 nem içeren Elbistan linyiti yumuşak linyit (nem içeriği %40-60) sınıfına girmektedir. Uçucu madde miktarı kuru-külsüz bazda %67,19 olan Elbistan linyiti Riediger sınıflamasına göre de yumuşak linyit sınıfına girmektedir (Kemal ve Arslan, 2010). Yumuşak linyitlerin, parça sağlamlıkları azdır. Bunlar üretilerek depolandıklarında, kuruma ve oksitlenme sonucu parça sağlamlıklarını tamamen kaybetmekte ve toz haline gelmektedir. Dolayısıyla yumuşak linyitlerin kül ve kükürt içeriklerinin uzaklaştırılmadan ve/veya briketleme işlemine tabi tutulmadan ev

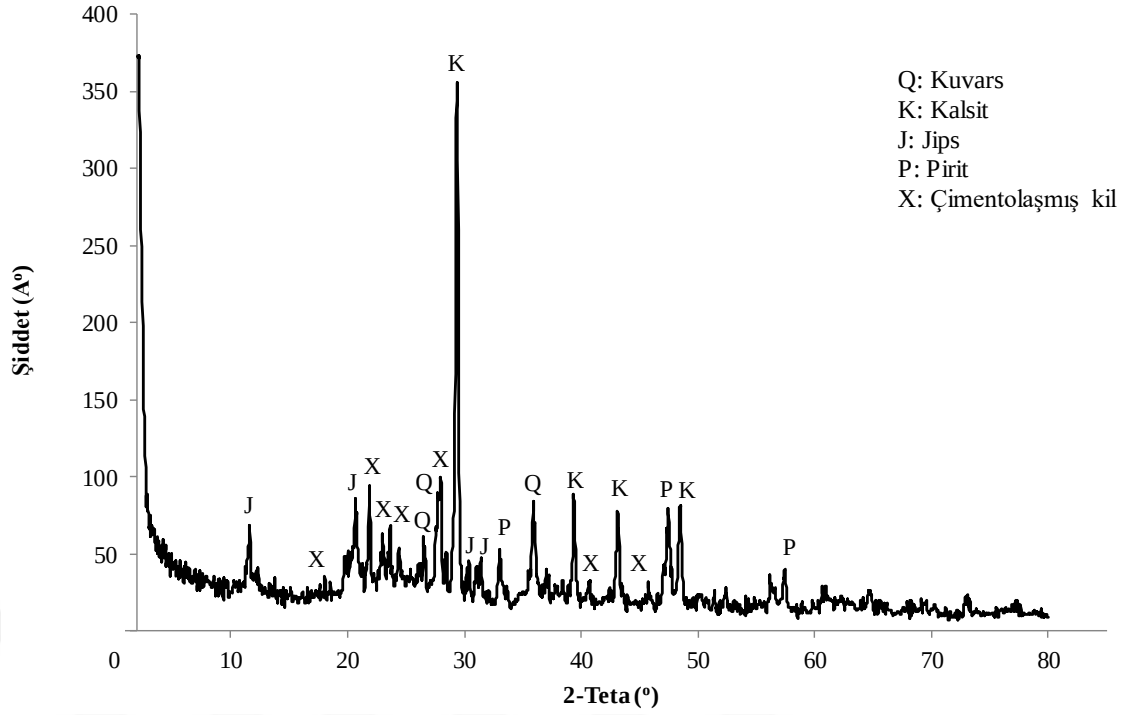
yakıtı olarak kullanılmaları doğru değildir. En büyük yumuşak linyit yataklarımızdan biri olan Elbistan linyitinin kül oranı oldukça yüksektir (kuru bazda %40'ın üzerinde). Çizelge 3.3'e göre Elbistan kömürünün havada kuru bazdaki %39,65 gibi yüksek olan kül içeriği ile uyumlu araştırmalar olmakla birlikte (Cicioğlu Sütçü ve Karayiğit, 2015; Uzun ve Özdoğan, 2011; Uzun ve Özdoğan, 2006; Kurumuş ve Yıldırım, 2004; Kemal ve Semerkant, 1988), farklı kül içerikleri bulunan çalışmalar da mevcuttur (Karayiğit vd., 2000; Karayiğit ve Gayer, 2000; Çakal vd., 2007; Sakintuna ve Yürüm, 2004). Sonuç olarak damar kalınlığına ve bulunduğu bölgeye göre Elbistan linyitlerinin kül içeriklerinin çok fazla değiştiği anlaşılmaktadır.

Havada kuru baza göre gerçekleştirilmiş olan Elbistan linyitinin tane boyutuna göre kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon değişimleri Şekil 3.14'de verilmiştir. Şekil 3.14 incelendiğinde, beklendiği gibi Elbistan linyitinin tane boyutu arttıkça kül içeriğinin azaldığı, buna karşılık alt ısı değer ve sabit C oranının arttığı belirlenmiştir. Nem ve uçucu madde içeriğinin ise tane boyutuna göre değişiklik göstermediği tespit edilmiştir. ASTM sınıflamasına göre Elbistan linyiti, kuru külsüz bazda üst ısı değeri 5322 kcal/kg olduğundan Alt bitümlü-B sınıfına dahildir (Çizelge 2.2).



Şekil 3.14. Havada kuru baza göre Elbistan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak kısa analiz değerlerinin değişimi

Elbistan linyit örneğinin XRD analizi sonucu (Şekil 3.15) incelendiğinde, linyit yapısında kuvars (SiO_2), kalsit (CaCO_3), jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pirit (FeS_2) ve çimentolaşmış kil minerallerine ait pikler belirlenmiştir.



Şekil 3.15. Elbistan linyitinin XRD analiz sonucu

Havada kuru bazda %39,65 kül içeriğine sahip olan Elbistan linyitinin Ankara MTA Genel Müdürlüğü Laboratuvarlarında yaptırılan petrografik analiz sonuçlarına göre;

- Maseral ve mineral dağılımına bakıldığında; hacimce maseral dağılımının %50 vitrinit (hüminit), %4 eksinit (liptinit) ve %6 inertinit grubundan; mineral dağılımının ise %6 framboidal pirit ve %34 diğer mineral maddelerden oluştuğu belirlenmiştir. Sahada kül dağılımlarının çok fazla değişkenlik göstermesi nedeniyle, buna bağlı olarak maseral miktarları da literatürde değişiklik göstermektedir (Sütçü ve Karayiğit, 2009). Ancak maseral türlerinin çeşitliliklerinde belirgin bir farklılık belirlenmemiştir.
- Mikrolitotip dağılımında ise %35 vitrit, %9 klarit, %4 vitrinertit, %3 duroklarit bulunmaktadır. Buna göre, %35 monomaseralik, %13 bimaseralik, %3 trimesaralik ve %49 karbominerit gruplarından oluştuğu tespit edilmiştir.

Kurak ve sıcak ortamlarda veya zamanlarda inertinit gruplarının ve nemli atmosfer ortamlarında da vitrinit gruplarının oluştuğu düşünülürse (Suarez-Ruiz ve Ward, 2008), Elbistan linyitinde %50 vitrinit (hüminit) grubu maseralin bulunması, oluşum ortamının açık getirimli bataklık (saz veya kamış) ortam olduğuna işaret etmektedir (Sütçü ve Karayiğit, 2009). Koklaştırma açısından vitrinit grubu önemli bir maseral grubudur. Ancak koklaştırma açısından vitrinit grubunun uçucu madde oranının %19-35 (kuru-külsüz bazda) olması istenmektedir.

Elbistan linyitinin kuru-külsüz bazda %67,19 uçucu madde içermesinden dolayı koklaşma ürününün parça değil de toz halinde çıkması beklenen bir durumdur.

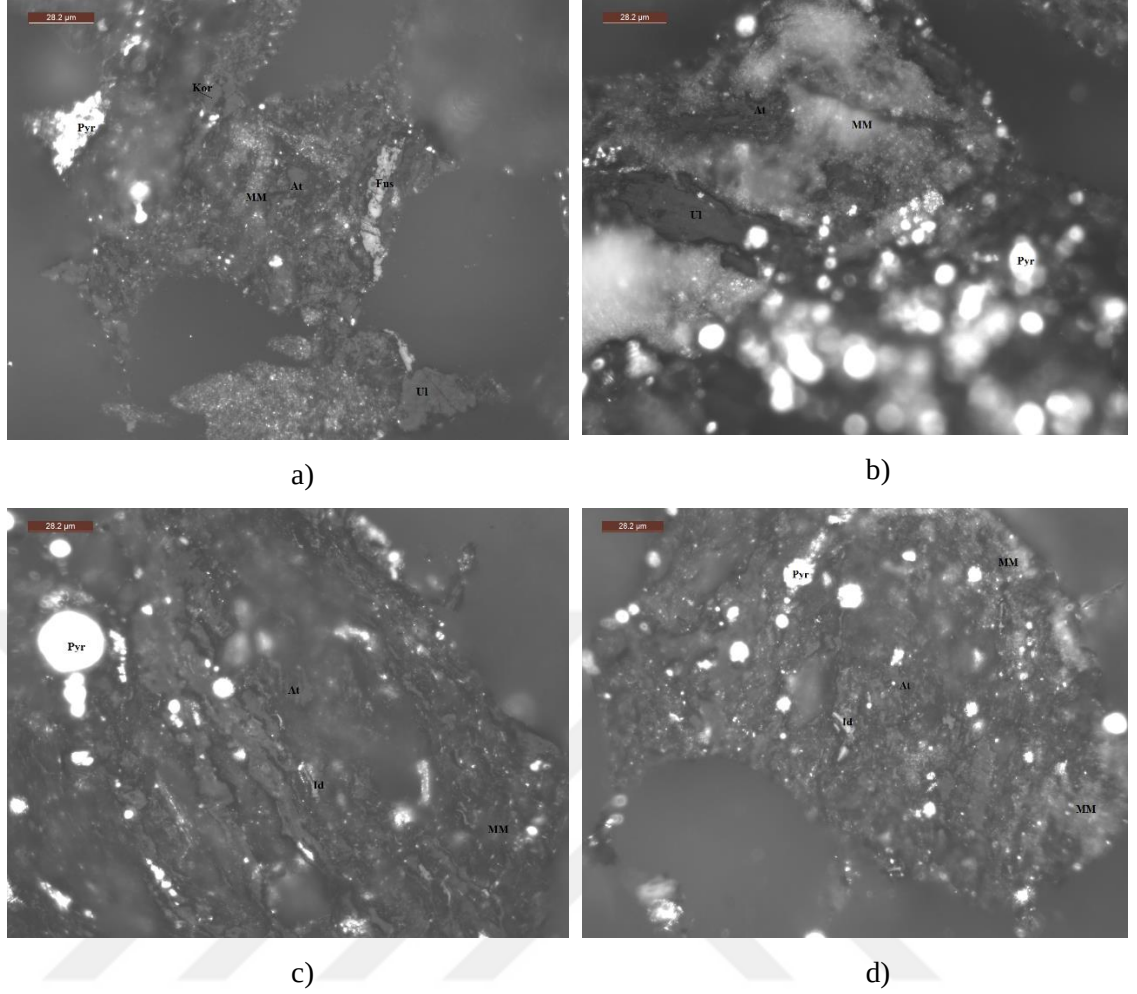
Kömürlerde genellikle %5-10 arasında bulunan eksinit grubu, Elbistan linyitinde %4 oranında bulunmaktadır. Bu miktar esasen koklaştırma sırasında plastikleşme için yeterli değildir. Hidrojence zengin yüksek uçucu madde içeriklerinden dolayı çoğunlukla katran ve gaz ürün olarak alınmaktadır. Elbistan linyitinde %6 oranında bulunan inertinit grubu maseraller, koklaşmada etkin rol oynayamayacağını göstermektedir.

Elbistan linyitinin petrografik analizinde önemli bulgulardan biri de piritle beraber mineral madde miktarının hacimce %40 olmasıdır. Bu durum, gravite ve flotasyon zenginleştirilmesi açısından linyitten kül ayırımının nispeten zor olacağına işaret etmektedir. Şekil 3.16'dan, Elbistan linyitinde safsızlıkların (kil, kireçtaşı vb.) çok fazla olduğu ve dolayısıyla oluşum açısından kömürleşme sırasında (sinjenetik) meydana geldiği ve mineral madde boyutunun yaklaşık 30 mikronun altında olduğu görülmektedir. Külden uzaklaştırma çalışmalarında %39,65 külden %27 küle kadar uzaklaştırılabilmesi de mineral maddenin oluşum sırasında kömüre karıştığına bir göstergesidir. Yıkama çalışmalarının tamamında külden uzaklaştırmanın göreceli olarak zor olacağı beklenmiştir.

Petrografik analizler ile XRD analizi birlikte değerlendirildiğinde ise; Şekil 3.16'da ince kesit resminde görülen çok ince boyutlu mineral maddenin, XRD analizlerinde bulunan kil mineralleri olması kömür yıkamanın oldukça zor olacağının diğer bir göstergesidir. İnce kesit resimleri çok ince boyutlu kil mineralinin linyit ile beraber (sinjenetik) çökeldiğini açık bir şekilde göstermektedir.

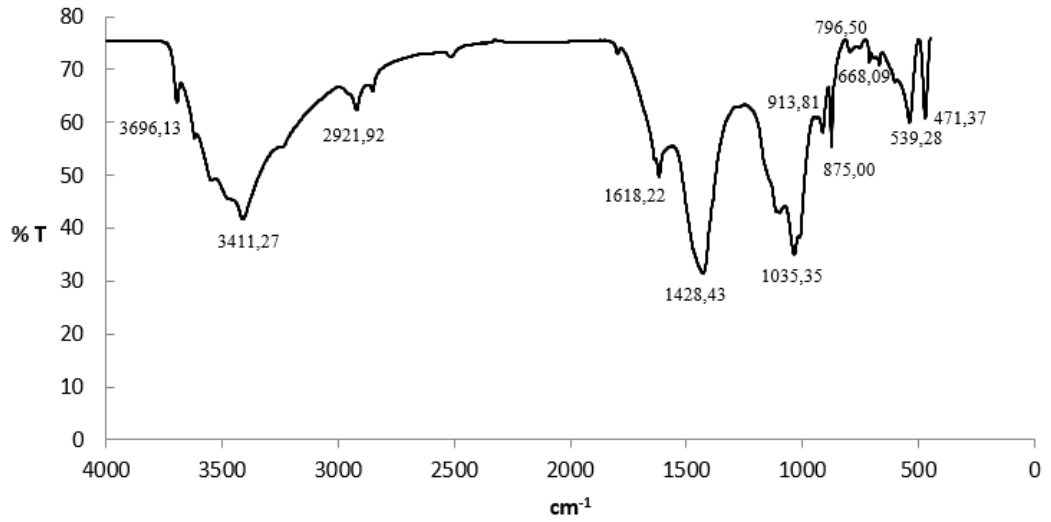
Elbistan linyitinin ince kesit resimlerinde (Şekil 3.16) framboidal (küresel) piritin ince boyutta (yaklaşık 10-30 mikron arası) ve yüksek miktarda (%6) dağılım gösterdiği izlenmiştir. Buna göre gravite zenginleştirmelerinin çok hassas ve zor olacağı sonucu çıkarılabilir. Gravite ayırımı sırasında birçok parametrede elde edilen yüksek kül ve kükürt içeriği de bu yargıyı doğrular niteliktedir.

Elbistan linyitinin mikrolitotip analizinden elde edilen %49 karbominerit grubunun bulunması, linyitle beraber yüksek miktarda sinjenetik kökenli kil mineralinin bulunduğunu belirtmektedir. Kömürle beraber karbominerit miktarının yüksek oluşu göreceli olarak koklaştırmanın da zor olacağına işaret etmektedir.



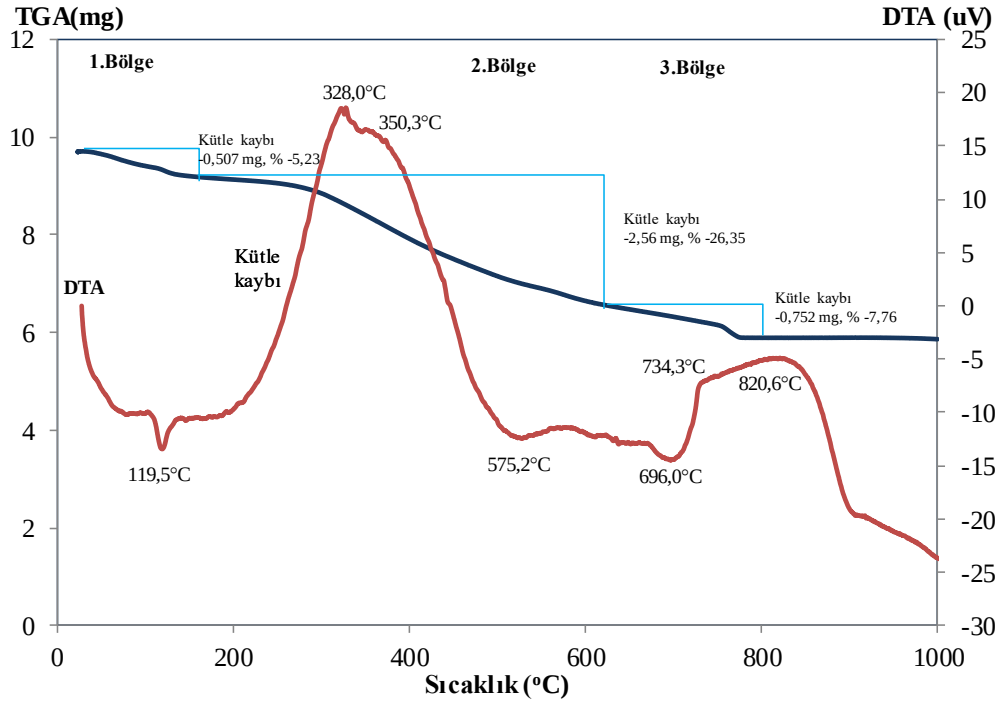
Şekil 3.16. Elbistan linyitinin ince kesitte maseral görüntüsü, (Ul: Ülminit, At: Atrinit, Kor: Korpohüminit, Id: İnertodetrinit, Fus: Füzinit, Pyr: Framboidal pirit, MM: Mineral madde)

Yapısal analizi desteklemek ve fonksiyonel grupları belirlemek amacıyla yapılan FTIR spektrumu Şekil 3.17’de verilmiştir. Şekil 3.17’de FTIR spektrumunda görülen yaklaşık 3696 cm^{-1} ve 3411 cm^{-1} dalga boylarında görülen pikler, sudaki hidroksil gruplarına ya da fenolik bileşiklere bağlı olarak ortaya çıkan -OH gerilme pikleridir. Hidrokarbon türlerine bağlı olarak ortaya çıkan ve alifatik yapıyı gösteren -CH titreşim bandı ise 2922 cm^{-1} değerinde görülmektedir. 1618 cm^{-1} 1428 cm^{-1} piklerinin aromatik yapıdaki $\text{C}=\text{C}$ ve $\text{C}=\text{O}$ karbonil gerilmelerini gösterdiği bilinmektedir (Elbeyli ve Pişkin, 2006; Kizgut vd. 2003; Zhang vd. 2015). 1035 cm^{-1} civarı piki Si-O-Al/Fe/Mg vb. gerilmeleri, 914 cm^{-1} , 875 cm^{-1} ve 797 cm^{-1} pikleri C-H aromatik bileşenlerine ait yapıları göstermektedir (Silverstein, 1981).



Şekil 3.17. Elbistan linyitinin FTIR spektrumu

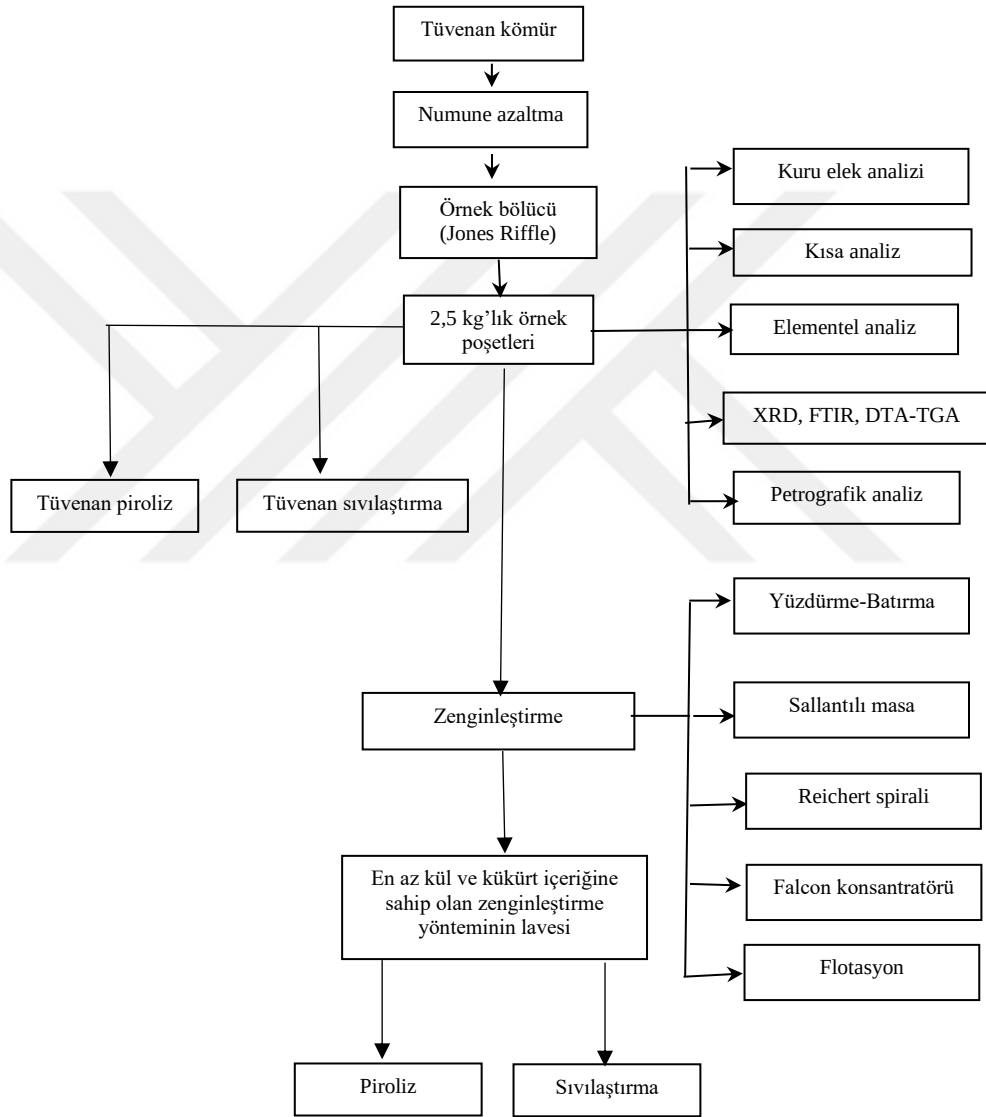
Elbistan linyitinin termodinamik davranışını anlayabilmek amacıyla hava ortamında yapılan termal gravimetrik (DTA-TGA) analiz eğrisi Şekil 3.18’de verilmiştir. Şekil 3.18’deki DTA eğrisi 3 bölgeye ayrıldığında; 1.bölgede yaklaşık 119°C’deki pik bünye nemini, 328°C’de başlayıp 575°C’de sona eren uçucu madde çıkışı 2.bölgeyi, sabit karbonun yanması sonucu oluşan 575°C ile 734°C’ler arası ise 3.bölgeyi göstermektedir. Kısa analizden elde edilen %35,8 uçucu madde miktarı ile 2. ve 3.Bölgelerin %34,11 olan toplam kütle kayıplarının birbiriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.18. Elbistan linyitinin hava atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

3.2. Yöntem

Tez çalışması kapsamında takip edilen tüm aşamalar Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Buna göre, laboratuvara getirilen linyit örnekleri sahada orijinal olarak alınan kısım dışında, yere yayılan bir bez üzerinde havada kurumaya bırakılmıştır. Havada kurutulan linyit örnekleri, konileme-dörtleme yöntemiyle azaltılmış ve Jones Riffle örnek bölücüyle yaklaşık 2,5 kg'lık kısımlara ayrıldıktan sonra deneylerde kullanılmak üzere kapalı naylon poşetlere konulmuştur. Tüm analizler ve deneyler havada kuru bazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19. Çalışmaların gösterildiği genel akım şeması

Karakterizasyon alışmaları için linyit örnekleri, laboratuvar tip tek istinat kollu çeneli kırıcıyla 30 mm altına kırıldıktan sonra Fritsch marka çekiçli kırıcı ile 3 mm altına kırılmış, yatay döndürmeli elik bilyalı değirmen ve Retsch marka halkalı değirmen ile tlerek 38  m boyutunun altına indirilmiştir.

Petrografik analizlerde kullanılmak amacıyla linyit örnekleri çekiçle kırıldıktan sonra 50x50x50 mm boyutlarında saf kömür parçaları elle ayrılmıştır. Alınan rnekler petrografik analiz yapılmak üzere Maden Tetkik Arama laboratuvarlarına gönderilmiştir.

Yüzdürme-batırma deneyleri için linyit örnekleri benzer şekilde çeneli kırıcıyla 30 mm altına geçirildikten sonra -31,5+19 mm, -19+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm olmak üzere iri, orta ve ince boyut gruplarına ayrılmıştır. 0,5 mm altı ise ince boyut ve külünün yüksek olmasından dolayı yüzdürme-batırma testlerine alınmamıştır.

Sallantılı masa ve Reichert spirali deneyleri için linyit örnekleri ilk aşamada çeneli kırıcıyla 30 mm altına, ikinci aşamada çekiçli kırıcı ile 3 mm altına kırıldıktan sonra -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm olmak üzere 3 boyut grubuna ayrılmıştır. 0,15 mm boyutu ise şlam oluşturmasını önlemek ve yüksek kül içerdiğinden dolayı deneye alınmamıştır.

Falcon konsantratörü ve flotasyon deneyleri için linyit örnekleri benzer şekilde çeneli kırıcı ile 30 mm altına ve çekiçli kırıcı ile 3 mm altına kırıldıktan sonra, bilyalı değirmen ile tlerek Falcon konsantratör için tamamı 500  m, 212  m ve 150  m altına; flotasyon için ise 212  m, 150  m ve 106  m altına indirilmiştir. Öğütme kuru yapılarak, %80 kritik hızda, %35 şarj oranında 20 dakika aralıklarla durdurularak belirlenen elek boyutlarında numunenin tamamı elenmiştir.

Piroliz deneyleri için linyit örnekleri çeneli kırıcıyla 30 mm altına indirildikten sonra Vommak marka merdaneli kırıcıdan kırılarak kapalı devre halinde tamamı 4,75 mm, 3,35 mm ve 1,18 mm altına indirilene kadar geçirilmiştir.

Sıvılaştırma deneyleri için linyit örnekleri benzer şekilde 30 mm altına çeneli kırıcı ve 3 mm altına çekiçli kırıcı ile kırıldıktan sonra, bilyalı değirmen ile öğütülmüştür. Linyit rnekleri yukarıda belirtilen aynı değirmen şartlarında tlerek tamamı 150  m altına indirilmiştir.

Tez çalışmasında yüzdürme-batırma testleri için havada kuru kömür rneği -31,5+19 mm, -19+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm olmak üzere 3 boyut grubuna ayrıldıktan sonra, ZnCl₂ ile yoğunlukları 1,3-1,4-1,5-1,6-1,7 ve 1,8 g/cm³ olan ağır ortamlar hazırlanmış ve bu boyut gruplarına yüzdürme-batırma testleri uygulanmıştır.

Tez çalışmasında yapılan sallantılı masa deneylerinde Şekil 3.20’de gösterilen laboratuvar tip klasik Wilfley masası kullanılmıştır. Deneyler için havada kuru linyit örneği -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm olmak üzere iri, orta ve ince boyut gruplarına ayrıldıktan sonra 100 dev/dk, 150 dev/dk, 200 dev/dk masa hızlarında ve 2°, 4° ve 6° masa eğimlerinde sallantılı masa deneyleri yapılmıştır.



Şekil 3.20. Sallantılı masa deneylerinde kullanılan Wilfley masası

Deneyisel çalışmalar, Şekil 3.21’de verilen patenti Sepro L40 model Falcon konsantratör cihazında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında yapılan Falcon konsantratör deneylerinde %30 katı oranı ve 1,5 l/dk besleme hızı sabit tutularak, optimum tane boyutu ve merkezkaç kuvveti (G) test edilmiştir. Tamamı 500 µm, 212 µm ve 150 µm altına indirilen linyit örneklerine 20G, 78G, 176G ve 300G merkezkaç kuvvetlerinde testler uygulanmıştır.



Şekil 3.21. Falcon deneylerinde kullanılan Falcon L40 cihazı

Tez çalışmasında -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm boyut gruplarına ayrılan linyit örnekleri, Şekil 3.22’de verilen Denver şirketinin HG-7D model Reichert spirali, kül ve kükürt uzaklaştırması amacıyla kullanılmıştır. Reichert Spirali ile kömür yıkaması uygulamalarında %7,5, %15, %25 ve %35’lik pülpte katı oranları ve 90°, 120° ve 150°’lik bıçak açıklıkları test edilmiştir.



Şekil 3.22. Zenginleştirme deneylerinde kullanılan Reichert spirali

Tez çalışmasındaki flotasyon deneyleri, Şekil 3.23’de gösterilen Denver tipi flotasyon makinasında 1,5 lt hücre kullanılarak, -212 μ m, -150 μ m ve -106 μ m olmak üzere 3 farklı tane boyutu; gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot olmak üzere 3 farklı toplayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23. Flotasyon deneylerinde kullanılan Denver flotasyon cihazı

Tez çalışmasındaki zeta ölçümlerinin yapıldığı zetametre cihazı Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Zeta potansiyel ölçümü için kullanılan zetametre

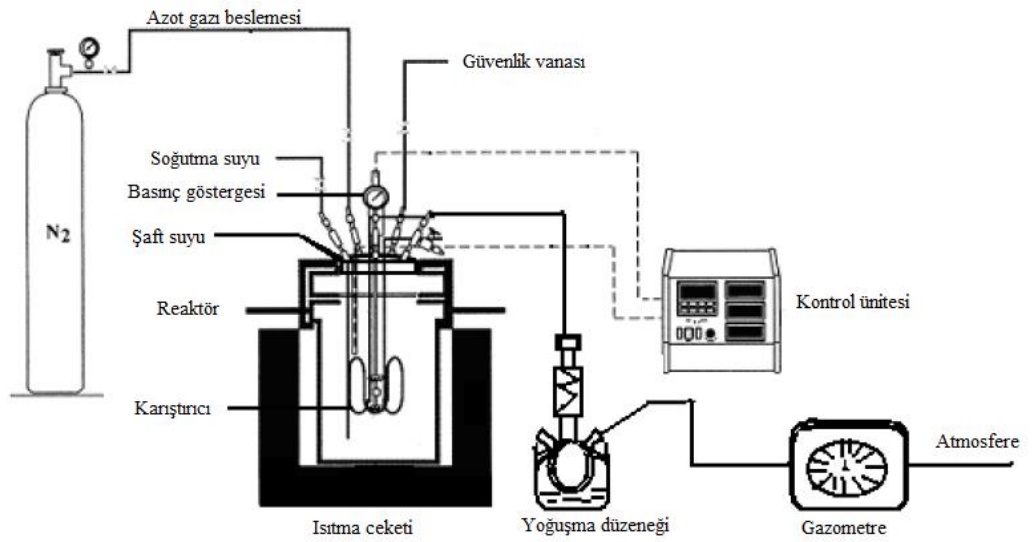
Tez çalışmasındaki piroliz deneyleri, Şekil 3.25’de verilen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Piroliz çalışmalarında 200 ml/dk N_2 gazı akışı ve $3^\circ C/dk$ ısıtma hızı sabit tutularak optimum tane boyutu, sıcaklık ve piroliz süresini belirlemiştir. Optimum tane boyutunu belirlemek amacıyla numunelerin tamamı 4,75 mm, 3,35 mm ve 1,18 mm tane boyutlarının altına indirilerek, $500^\circ C$ ’de 30 dakika süreyle piroliz deneyleri yapılmıştır.

Optimum sıcaklığı belirlemek amacıyla belirlenen tane boyutunda 30 dakika süreyle, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800 °C sıcaklıklarda piroliz deneylerine devam edilmiştir. Son aşamada ise belirlenen tane boyutu ve sıcaklıkta 15, 30, 45 ve 60 dakika piroliz süreleri deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.25. Piroliz deneylerinde kullanılan tüp fırın

Tez çalışmasındaki sıvılaştırma deneylerinde kullanılan deney düzeneği grafiksel olarak Şekil 3.26’da, kesikli reaktöre ait fotoğraf ise Şekil 3.27’de verilmiştir. Şekil 3.26’da görüldüğü gibi, sıvılaştırma düzeneği; azot tüpü, otoklav, yoğuşturucu, gazölçer ve sıcaklık kontrol biriminden oluşmaktadır.



Şekil 3.26. Sıvılaştırma deney düzeneğinin görünümü



Şekil 3.27. Sıvılaştırma deneylerinde kullanılan kesikli reaktör

Sıvılaştırma deneylerinde tam karıştırmalı kesikli bir reaktör olan, 500 ml hacminde PARR 4575/4842 marka reaktör, sıvılaştırma ürünlerini ayırmak için bir Soxhlet düzeneği, döner evaporatör cihazı (Büchi R-200, V-800) ve örneklerin kurutulmasında ise vakum etüvü (Nüve-Ev 018), ısıtma ve karışırtmalar için sıcaklık ve devri ayarlanabilir magnetik karışırtıcı ısıtıcılar (Heidolph MR 3001) ve sıvılaştırma esnasında oluşan gaz ürünlerin hacmini ölçmek için bir gazometre (Alexander Wright London) kullanılmıştır.

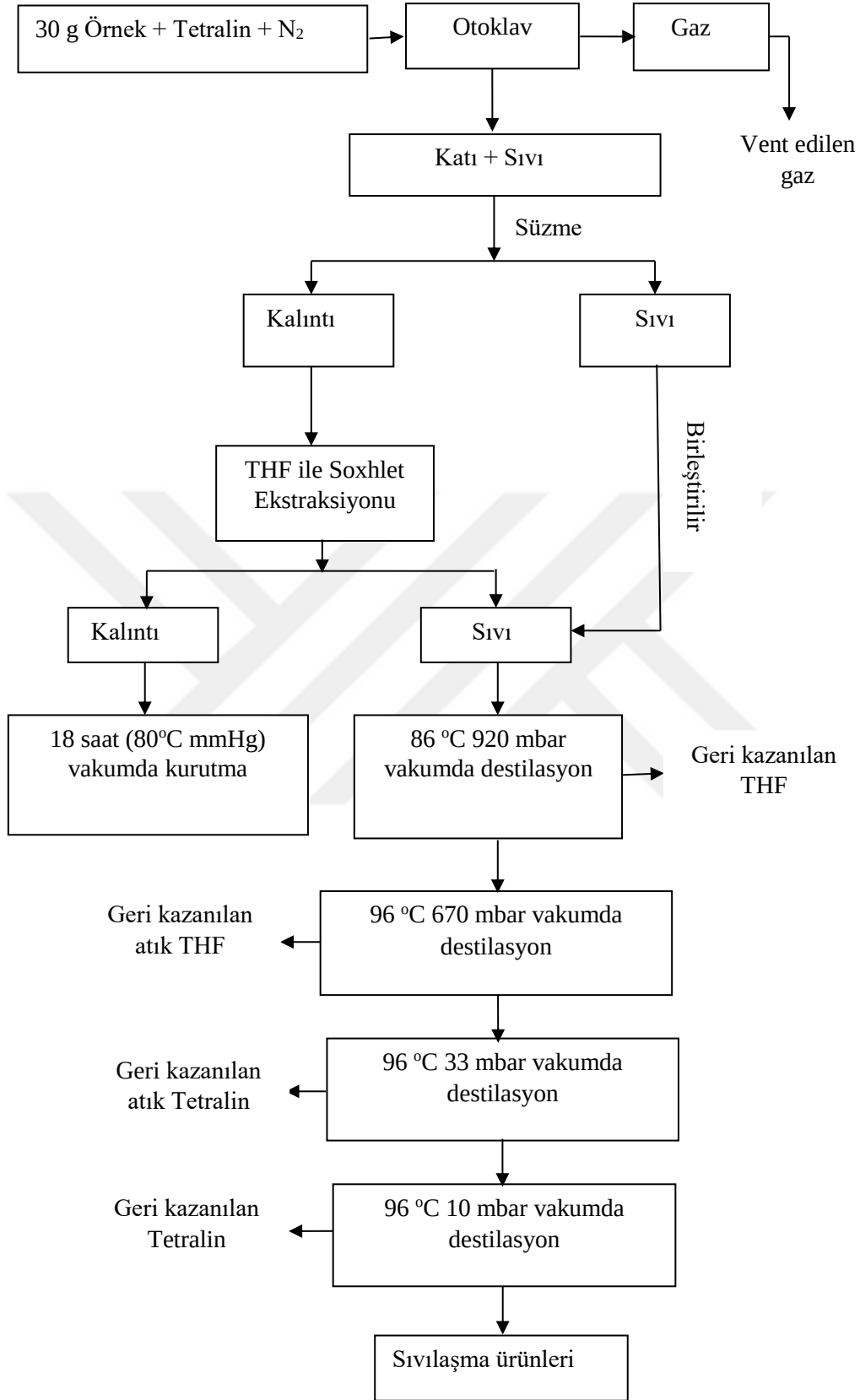
Deneylerde hassas olarak ölçülen 30 g linyit örneği 1/3 oranında yani 90 ml tetralin ($C_{10}H_{12}$) ile birlikte otoklava konup kapatılmıştır. Reaksiyon sistemindeki havayı uzaklaştırmak için, gaz giriş ve çıkış vanaları açılarak ortam 30 dakika süreyle N_2 gazı ile temizlenmiştir. Daha sonra gaz çıkış vanaları kapatılıp başlangıç basıncı 20 bar oluncaya kadar reaksiyon ortamına N_2 gazı beslenmiştir. Otoklavda herhangi bir kaçağın olup olmadığını kontrol etmek için 45 dakika süreyle bekletilip otoklav basınç göstergesinde bir düşme olup olmadığı kontrol edilmiştir. Daha sonra, sırasıyla ısıtıcı ve karışırtıcı açılarak seçilen reaksiyon sıcaklığına ulaşana kadar ısıtıcı yardımıyla otoklav yaklaşık $3-4^{\circ}C/dk$ hızla ısıtılmıştır. $400^{\circ}C$ sıcaklıkta 2 saat beklenmiştir. Hem ısıtma hem de reaksiyon sırasında 400 devir/dk sabit hızla karışırtılmıştır. Reaksiyon süresi bittikten sonra sırasıyla ısıtıcı ve karışırtıcı kapatılıp, reaksiyon ortamında gazlarla beraber asılı halde bulunan çok küçük taneciklerin çökmesine izin vermek için yaklaşık 60 dakika beklenmiştir. Daha sonra otoklavın gaz boşaltım vanası açılarak, gaz ürünler bir soğutucudan geçirilerek gazlarla sürüklenen yoğunlaşabilir ürünler tutulmuş; yoğunlaşmayan gazlar ise, bir yağ gazometrede toplam hacimleri ölçüldükten sonra atmosfere verilmiştir. Gaz boşaltım işlemi bittikten sonra otoklav sıcaklığının ortam sıcaklığına soğuması için yaklaşık 1-2 saat bekledikten sonra otoklav açılarak, içindeki katı+sıvı ürünler bir behere boşaltılmıştır.

Katı+sıvı ürünler birbirinden süzme işlemi ile ayrılmıştır. Katı ürünler içinde tutulmuş kömür sıvılaşma ürünlerini ayırmak için, katı ürünlere tetrahidrofuran (THF) (C_4H_8O) ile soxhlet ekstraksiyonu yapılmıştır. Ekstraksiyona, kartuş bölgesindeki çözücü renksiz oluncaya kadar devam edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi bittikten sonra kartuş içindeki katı madde 80°C ve yaklaşık 550 mbar vakum basıncında 18 saat süreyle kurutulduktan sonra tartılmıştır. Çar verimleri üzerinden toplam dönüşüm oranı hesaplanmıştır.

Süzme işlemi sırasında elde edilen sıvı faz, döner evaporatöre alınarak 86 °C sıcaklık ve 920 atmosfer basınçta öncelikle sıvı fazdaki THF uzaklaştırılmış, daha sonra sıcaklık 96 °C'ye artırılıp basınç 670 mbar'a getirilerek atık THF kazanılmıştır. Çözeltideki tetralin, THF'den uzaklaşmış sıvı ürünün 96°C sıcaklık ve 33 mbar vakum basıncında geri kazanılmıştır. Daha sonra aynı sıcaklıkta 10 mbar vakum basıncında kalan ve temiz tetralin diye adlandırılacak olan tetralin kazanılmıştır. THF ve tetralinin uzaklaştırılmasından sonra geriye kalan çözelti büyük oranda sıvılaşma ürünlerinden oluşmaktadır.

Tetrahidrofuran (C_4H_8O)'da çözünebilen sıvılaşma ürünleri üzerine 300 ml hekzan ilave edilerek manyetik karıştırıcıda yaklaşık olarak 18 saat karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım mavi bir süzgeç kağıdından süzülerek, çözünen (yağlar) ve çözünmeyen (asfalten, preasfalten) ürünlerin ayrılması sağlanmıştır. Elde edilen hekzanda çözünen kısım bir döner buharlaştırıcı yardımıyla 86°C ve 96 atm basınçta distillenerek hekzan geri kazanılmıştır. Distillenmeyip geride kalan ürün yağlar olarak adlandırılmıştır.

Sıvılaşma deneyi basit akım şeması Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.28. Sıvılaştırma deneyinin akım şeması

Katı fazda bulunan ürünleri sınıflandırarak birbirinden ayırmak için bu ürünler yaklaşık 300 ml toluen ilave edilerek manyetik karıştırıcıda yaklaşık olarak 18 saat karıştırılmıştır. Daha sonra karışım mavi bir süzgeç kağıdından süzülerek, çözünen (asfalten) ve çözünmeyen (preasfalten) ürünlerin ayrılması sağlanmıştır. Süzülerek ayrılan katı ürün vakumda kurutularak toluende çözünmeyen ürün olan preasfalten (PAS) miktarı tespit edilmiştir. Çözelti fazı ise, vakum altında bir döner buharlaştırıcı yardımıyla distillenerek toluen geri kazanılmıştır. Geride kalan distillenemeyen kısım ise, vakumda kurutularak toluende çözünen ürün olan asfalten (AS) miktarı tespit edilmiştir. Tetrahidrofuran (THF, C₄H₈O) ile yıkanan katı ürün (çar), vakum koşullarında kurutulduktan sonra tartılarak çar verimleri belirlenmiş ve kül içerikleri açısından analizlenmiştir. Çar verimi ve dönüşüm oranlarının kuru-külsüz bazda hesaplanmasında kullanılan eşitlikler (3,1)-(3,5)'de verilmiştir;

Çar verimi:

$$\%Çar = \frac{Çar (g)}{Örnek (g)} \times 100 \quad (3,1)$$

Toplam dönüşüm oranı (Sıvılaşma ürünleri+gazlar):

$$\%Toplam dönüşüm = 100 - \%Çar \quad (3,2)$$

Kömür sıvılaşma ürünlerinin dönüşüm oranları:

Preasfalten (PAS),

$$\%PAS = \frac{PAS (g)}{Örnek (g)} \times 100 \quad (3,3)$$

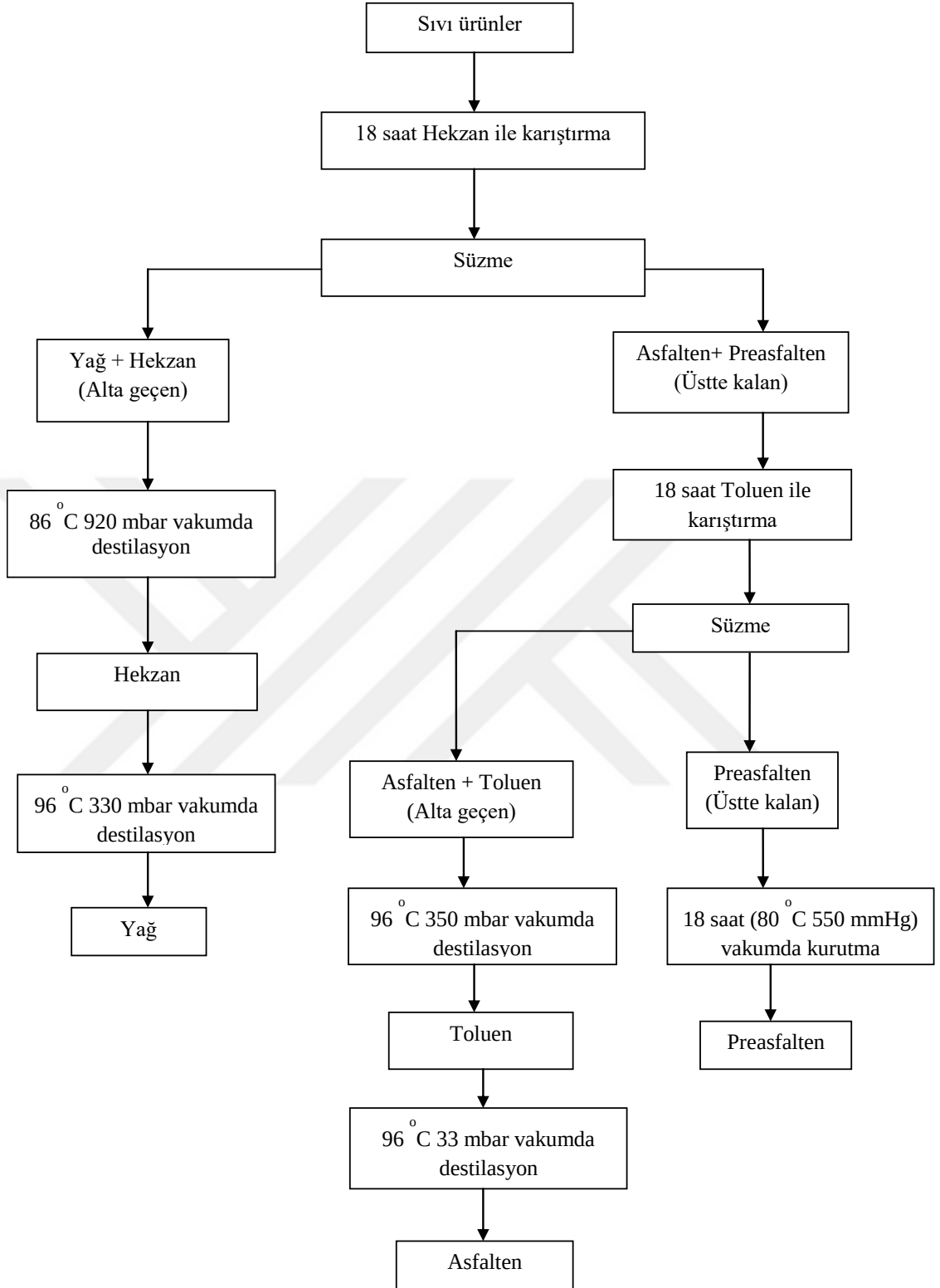
Asfalten (AS),

$$\%AS = \frac{AS (g)}{Örnek (g)} \times 100 \quad (3,4)$$

Yağ+gaz,

$$\%(Yağ + gaz) = \%Toplam dönüşüm - \%PAS - \%AS \quad (3,5)$$

Kömür çözünme ürünlerinin sınıflandırılmasına ilişkin akım şeması Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.29. Kömür sıvılaştırma ürünlerinin sınıflandırılması

Sıvılaştırma sonucu elde edilen ürünlerin kalorifik değerleri ölçülmüş ve GC-MS analizleri İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde (İBTAM) Agilent 890 GC 5973 MS cihazı ile yaptırılmıştır.

Çözünebilir ürün gruplarından preasfalten ve asfalten grubundaki bileşiklerin molekül ağırlıkları çok yüksek ve uçuculukları çok düşük olduğu için, sadece yağların gaz kromatografisi ile analizi yapılabilmektedir. Böylece bilinen bileşiklerin tutulma zamanlarından yararlanarak yağ numunelerinin nitel analizi yapılmıştır. GC-MS analizi koşulları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. GC-MS sistemi analiz koşulları

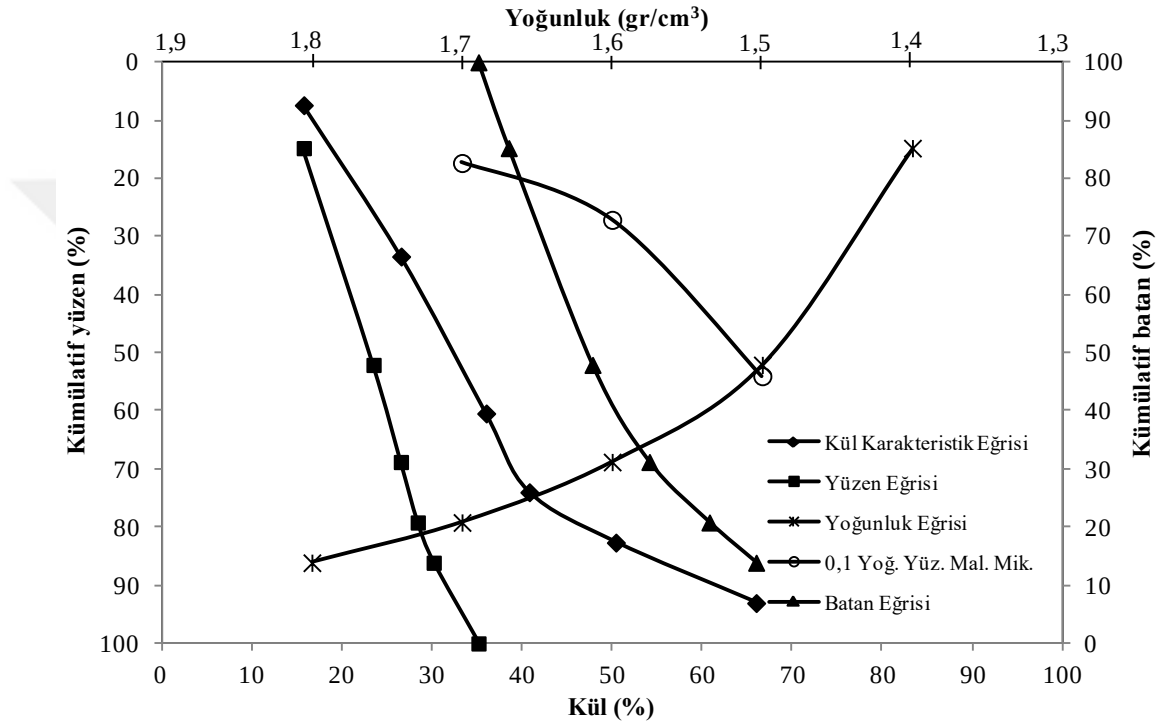
Kolon	HP-INNOWAX Capillary nominal kolon
Film kalınlığı	0,25 µm
Uzunluk	60 m
Çap	0,25 µm
Taşıyıcı gaz (He)	5 ml/dk
Örnek miktarı	2 ml
Dedektör	MS
Dedektör sıcaklığı	250 °C
Başlangıç sıcaklığı	60°C (1 dk izotermal)
Son sıcaklık	250°C (10 dk izotermal)
Isıtma hızı	25°C/dk
Çözücü	Hekzan (C ₆ H ₁₄)
Kolonda kalma süresi	98 dk

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Arguvan Linyiti

4.1.1. Yüzdürme-batırma deneyleri

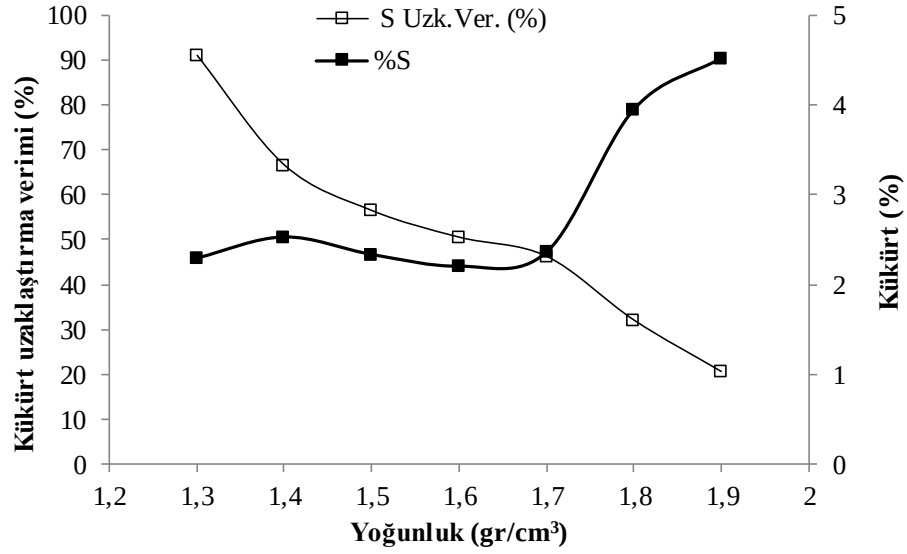
Yüzdürme-batırma testleri için havada kuru kömür örneği -31,5+19 mm, -19+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm olmak üzere 3 boyut grubuna ayrılmıştır. Her boyutta batan ve yüzen kömürlerin hesaplara birleştirilmesi ile elde edilen Arguvan linyitine ait yüzdürme-batırma eğrileri Şekil 4.1’de gösterilmiş ve deney sonuçları Ek 4’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Arguvan linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

$\pm 0,1$ yoğunlukta yüzen malzeme miktarına göre, $1,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta 17,33 olan bu değer linyitin yıkanabilirliğinin oldukça zor olduğunu göstermektedir. Yine kül karakteristik (parça kül) eğrisi de yukarıdan aşağıya doğru yavaş yavaş külü artarak inmekte ve sadece $1,68 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta bir bükülme göstermektedir. Dolayısıyla linyitin dar tane boyutunda, çok kontrollü olarak yıkanması gerekmektedir. Bu durum Abakay Temel vd. (2015) ile Birinci (2013)’nin çalışmaları ile de uyumludur.

Arguvan linyitinin ve birlikte bulunan kilin piknometre ile gerçekleştirilen yoğunluk analizinde sırasıyla $1,66 \text{ g/cm}^3$ ve $2,41 \text{ g/cm}^3$ bulunan özgül ağırlık değerlerinden elde edilen konsantrasyon kriteri (k) değeri 2,14 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre gravite ayırması nispeten kolay ve serbestleşme boyutuna bağlı olarak 0,1 mm’ye kadar tüm gravite yöntemleri teorik olarak uygulanabilir (Önal, 1980).



Şekil 4.2. Arguvan linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe (lave) kükürt uzaklaştırma değişimi

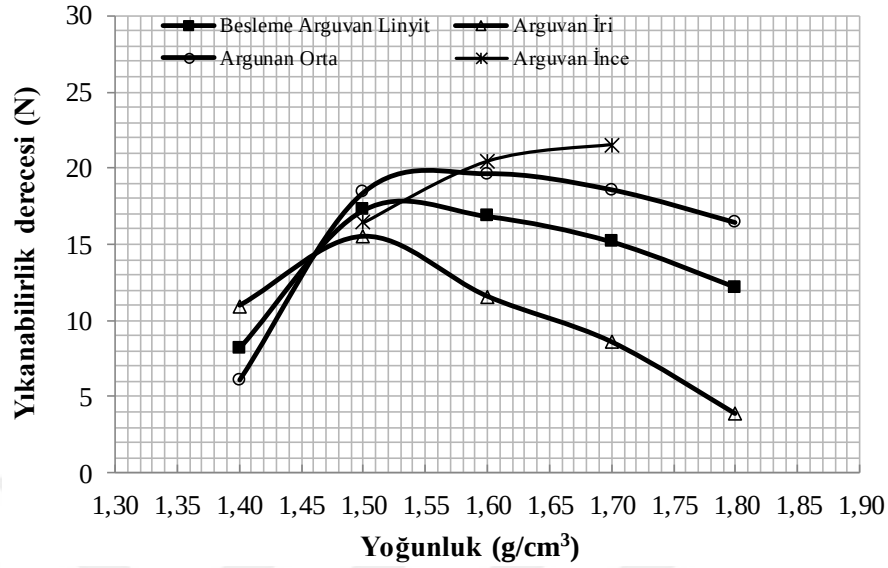
Şekil 4.2’den görüldüğü gibi yıkama yoğunluğu arttıkça toplam kükürt uzaklaştırma verimi azalmakta, buna karşılık kükürt içeriği artmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda Arguvan linyitinde %50 piritik kükürt, %50 bünye kükürdü olduğu düşünüldüğünde, 1,7 g/cm³ de %50 kükürt uzaklaştırma verimi elde edilmesi, piritin neredeyse tamamının laveden uzaklaştırıldığını göstermektedir.

- **Arguvan linyitinin yıkanabilirlik indekslerinin değerlendirilmesi**

Hesaplanan yıkanabilirlik derecesi (N) değerlerine karşı, her bir yüzen yoğunluğun fonksiyonu Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi, ince boyut hariç diğer boyut fraksiyonları için bir pik değeri elde edilmiştir. Optimum N değeri (N_{opt}) bu pik değerinin eşdeğeridir. Bu durumda ince boyut hariç diğer tüm boyutlarda, optimum ayırma yoğunluğunun veya optimum kesme noktasının yaklaşık 1,53 g/cm³ olduğu görülmüştür. En ince boyut için optimum ayırma yoğunluğu 1,7 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

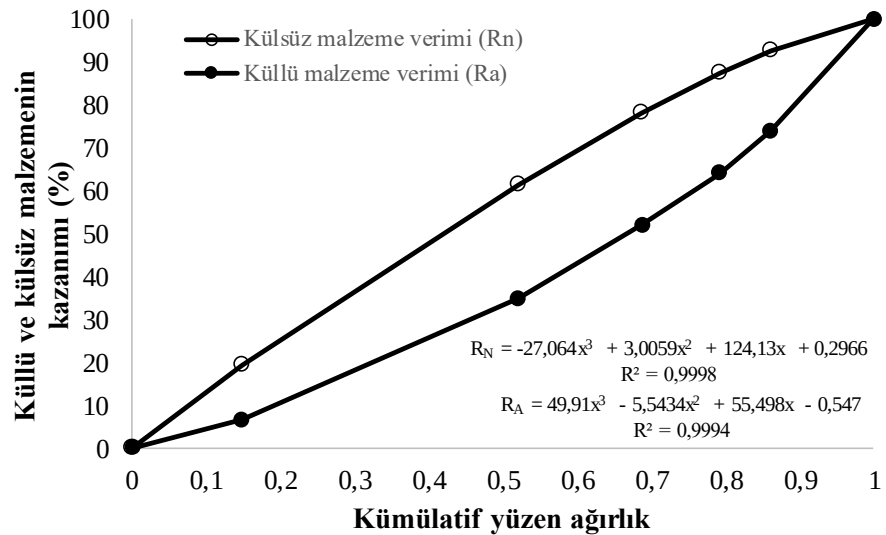
Eşitlik (3,1) ve (3,2)’den optimum ayırma yoğunluğunda yıkanabilirlik sayısı (W) değeri besleme, iri, orta ve ince boyut için sırasıyla 7,5-6,3-8,9-9,2 olarak hesaplanmıştır. Bulunan değerler Abakay Temel vd.’nin (2015) Arguvan linyiti için bulduğu değerler ile uyumaktadır. Hesaplanan N ve W değerleri literatürde verilen kolay yıkanan kömürlerin değerleriyle karşılaştırıldığında göreceli olarak düşük olduğu anlaşılmıştır (Ayhan ve Abakay Temel, 2008). Sonuç olarak Arguvan linyitinin orta derecede yıkanabilir özellikte olduğu ortaya çıkarılmıştır. Sarıkaya vd. (1995)’de çalışmalarında benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Arguvan linyitinin yıkanabilirlik sayısı 9’un altında olduğu için, linyitin uygulamada ufulanabileceği üst tane boyutu

10 mm veya 10 mm'nin altında olmalıdır. Yıkama yöntemi olarak +0,5 mm kömür için ağır-ortam siklonu veya eşdeğer (spiral) cihazı kullanılmalıdır (Ünlü, 1990).



Şekil 4.3. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi

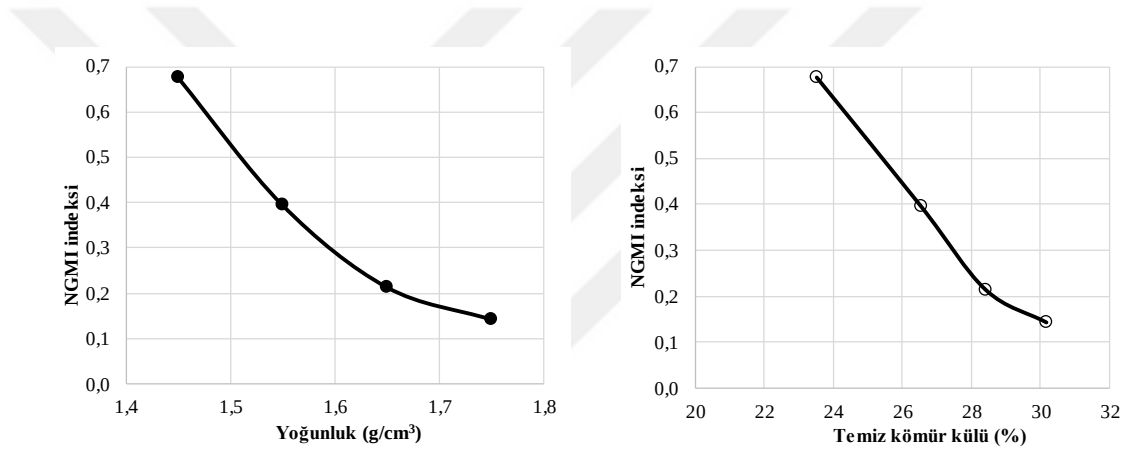
Yıkamanın kolay veya zor olduğunu belirlemek amacıyla, yıkanabilirlik sayısının dışında ayrıca Eşitlik (3,12)'den yıkanabilirlik indeksi (IW) ve Eşitlik (3,13)'den yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI) değerleri de hesaplanmıştır. Arguvan linyiti için kümülatif yüzen kısmın ağırlığına karşılık küllü (R_A) ve külsüz (R_N) ve külsüz malzeme verimleri Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Arguvan linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri

Şekil 4.4'deki R_A ve R_N denklemleri kullanılarak IW değeri 12,85 ve NGMI değerleri ise 1,45-1,55-1,65 ve 1,75 g/cm³ yoğunluklar için sırasıyla 0,68-0,39-0,21 ve 0,14 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Bu değerler literatürde zor yıkanan olarak tanımlanan kömürlerle benzeşmektedir. Örneğin; Mohanta vd. (2016), Hindistan Ananta kömürlerinin farklı boyutlara öğütülmüş ve sınıflandırılmış örnekleriyle yaptıkları çalışmalarda IW değerlerini 12,06 ile 42,39 arasında, NGMI değerlerini ise 0,2 ile 0,65 arasında hesaplamışlardır.

Yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yıkama yoğunluğu arttıkça yıkanabilirlik artarken, beklendiği gibi temiz kömür külü de artmıştır. NGMI değerine göre linyitin 1,65 ile 1,75 g/cm³ arasında yıkanması gerektiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar yıkanabilirlik eğrileri ve diğer indeksler ile uyum içerisinde. Hesaplanan tüm yıkanabilirlik indeksleri Çizelge 4.1'de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Arguvan linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri

Çizelge 4.1. Arguvan linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri

Ortalama yoğunluk (g/cm ³)	1	1,45	1,55	1,65	1,75
Konsantrasyon kriteri (k)	2,14				
±0,1 yoğ. yüzen malzeme miktarı		54,01	27,11	17,33	
Yakın malzeme yoğunluk indeksi (NGMI)		0,68	0,39	0,21	0,14
Yıkanabilirlik indeksi (IW/GIW)				12,85	
Yıkanabilirlik sayısı (W)			7,5		

4.1.2. Sallantılı masa deneyleri

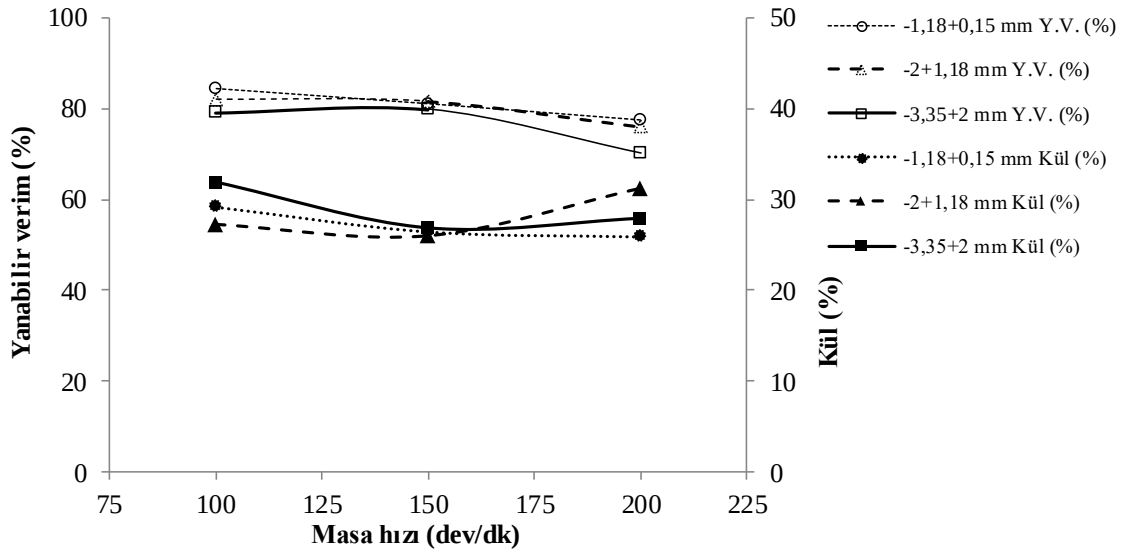
Deneyler için tüvenan linyit örneği çekiçli (darbeli) kırıcıdan geçirilerek, -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm olmak üzere iri, orta ve ince boyut gruplarına ayrılmıştır (Çizelge 4.2). Belirtilen boyut gruplarına ayrılan linyit örneklerine %25 katı oranında, 100 dev/dk, 150 dev/dk, 200 dev/dk masa hızlarında ve 2°, 4°, 6° masa eğimlerinde sallantılı masa deneyleri uygulanmıştır. Tez çalışmasında hedef kül içeriğini düşürmektir. Bu nedenle yorumlar daha çok lave külü baz alınarak yapılmıştır.

Çizelge 4.2. Arguvan linyitinin sallantılı masa ve Reichert spiriline beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri

Tane boyutu (mm)	Miktar (%)	Kül (%)
-3,35+2	29,34	35,91
-2+1,18	29,60	35,39
-1,18+0,15	31,27	34,97
-0,15	9,79	59,48
Besleme	100,00	37,77

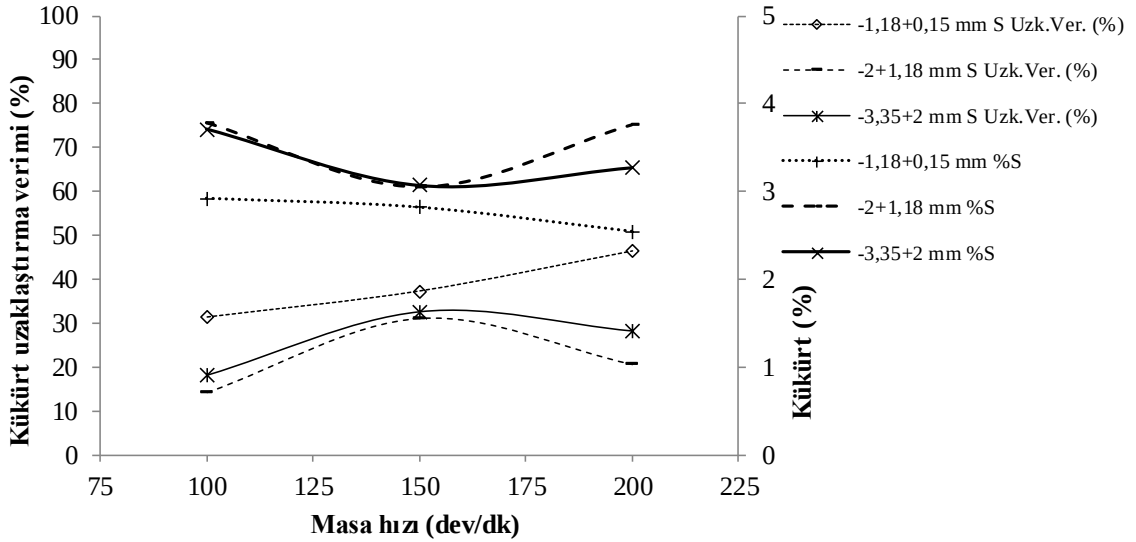
Arguvan linyitinin her bir boyut grubuna ait en uygun sarsıntı hızı ve eğim sonuçları, kül ve yanabilir verim açısından değerlendirilmiştir. Tane boyutlarına göre, sarsıntı hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkileri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'ya göre, literatüre uygun olarak ince boyutlarda yüksek sarsıntı hızında, iri boyutlarda ise düşük masa hızlarında çalışılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir (Önal, 1980; Wills, 1988). Yine literatüre uygun olarak lave külü ile yanabilir verim arasında ters bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir (Laskowski, 2001).

Sallantılı masa hızı toplam kükürt uzaklaştırılması açısından değerlendirildiğinde Şekil 4.7 elde edilmiştir. Şekil 4.7'den görüldüğü gibi sallantılı masa hızı toplam kükürt uzaklaştırmada çok etkili olmamıştır. Tane boylarının birleştirilmesiyle %3,85 S içeren besleme linyitinden, %36,5 uzaklaştırma verimiyle %2,69 S içeren lave elde edilmiştir. Dolayısıyla bu şartlarda piritin uzaklaştırılmadığı sonucuna varılabilir.

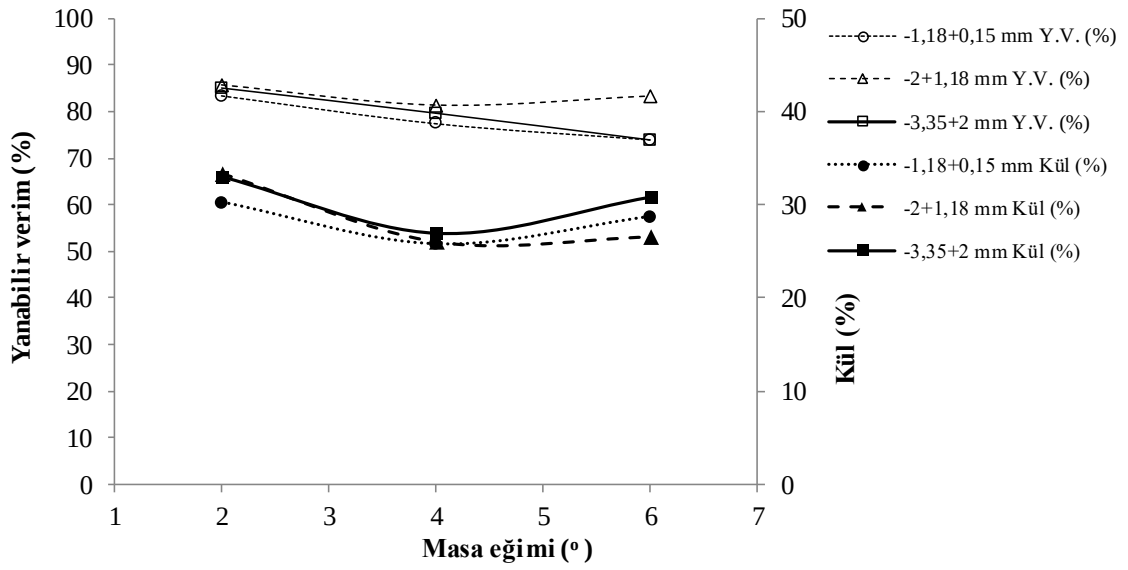


Şekil 4.6. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi

Optimum masa hızlarında gerçekleştirilen masa eğimi deneylerinde, kül ve yanabilir verim değişimini gösteren ilişki Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Sallantılı masa deneyine ait sonuçlar Ek 5’de verilmiştir.

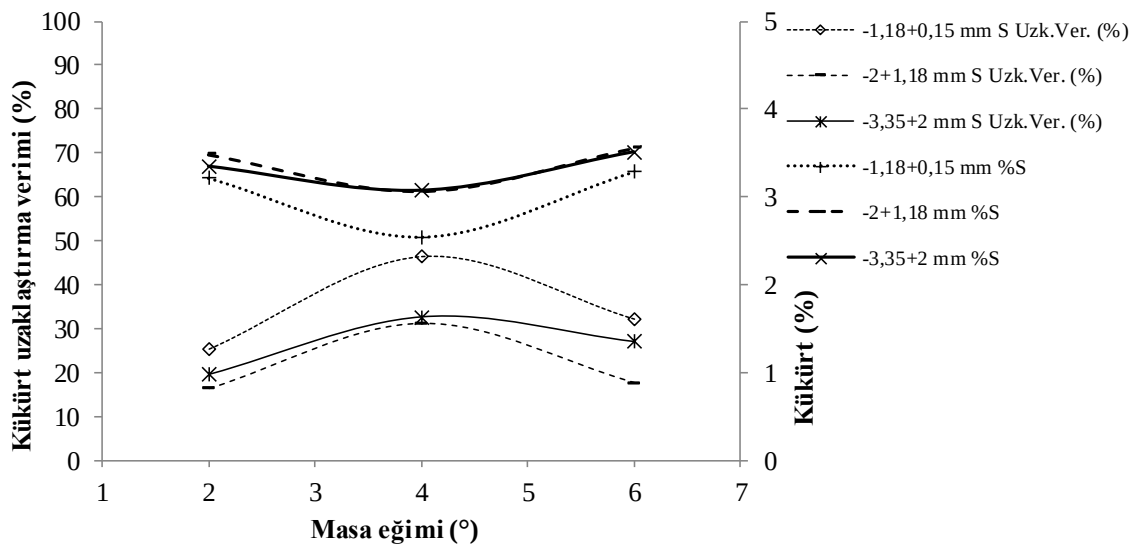


Şekil 4.7. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi



Şekil 4.8. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi

Şekil 4.8'den görüldüğü gibi, tüm boyutlarda lave külü açısından 4° eğimde çalışılması gerektiği anlaşılmıştır. Kül açısından değerlendirildiğinde masa hızı sonuçları, masa eğimi sonuçlarından daha iyi bulunmuştur. Bu durum ayırımında masa hızının daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. Sallantılı masa deneyleri sonucunda üç boyuttan alınan en iyi lavelerin birleştirilmesiyle, %37,77 küllü beslenen linyitten, %89,63 yanabilir verimle %26,27 küllü lave kazanılmıştır. Sallantılı masa eğiminin toplam kükürt uzaklaştırılması açısından değerlendirilmesi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi sallantılı masa zenginleştirilmesinin toplam kükürdün, dolaylı olarak piritik kükürt uzaklaştırma verimi üzerine önemli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir.



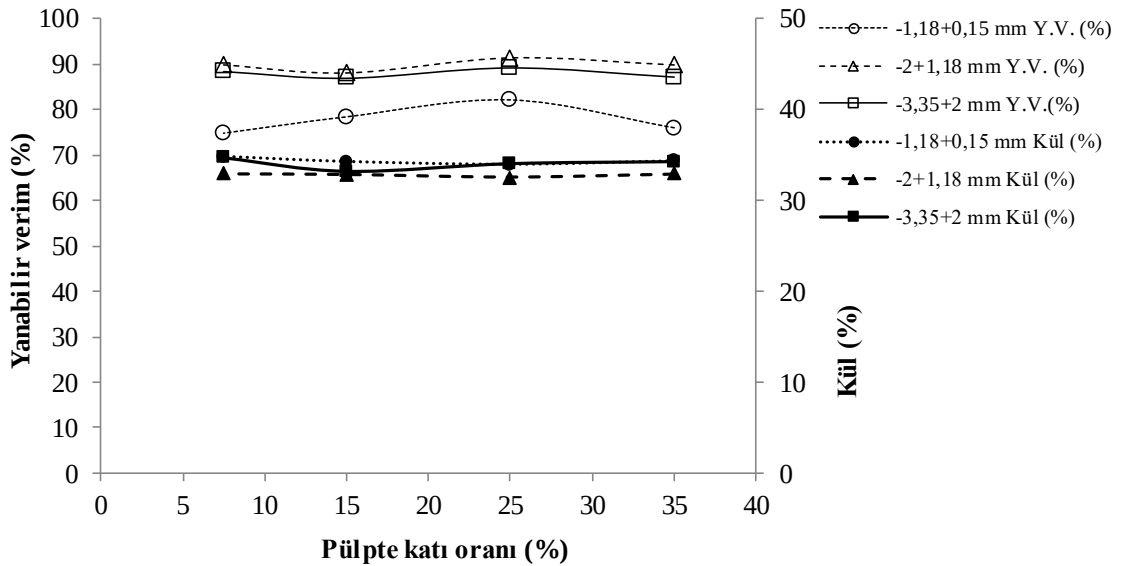
Şekil 4.9. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

4.1.3. Reichert spirali deneyleri

Reichert spirali kullanılarak -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyut grupları ile pülpte katı oranı ve ayırma bıçak konumu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tabaka halinde akan akışkan ortamda yapılan gravite ayırmalarında önemli bir parametre olan katı oranını belirlemek amacıyla, tüm tane boylarında konsantre bıçak açıklığı 150° sabit tutularak %7,5, %15, %25 ve %35'lik pülpte katı oranları denenmiştir.

-3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyutundaki örnekler için, pülpte katı oranı değiştirilerek elde edilen Reichert spiral sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. -3,35+2 mm tane boyutu için %15 katı oranı, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyutlarında ise %25 katı oranında en düşük lave külleri elde edilmiştir. Ancak katı oranlarına göre lave küllü ve yanabilir verim değişimleri arasında belirgin bir farklılık olmadığından, ekonomiklik açısından yüksek katı oranıyla da ayırım yapılabileceği görülmektedir. Bilindiği gibi gravite ayırmasında engelli çöküş şartları pülpte katı oranını arttırarak sağlanmaktadır. Yüksek katı oranında belirgin bir kötüleşmenin olmaması engelli çöküş şartlarıyla açıklanabilir. Elde edilen deney bulguları Altun ve Hiçyılmaz (2002) ile Öney vd. (2014)'nin çalışmalarının sonuçlarıyla da uyumludur.

Reichert spirali ile yapılan katı oranı belirleme deneylerindeki tüm boyutların lave küllerinin birleştirilmesiyle %33,21 küllü lave %90,22 yanabilir verimle kazanılmıştır.

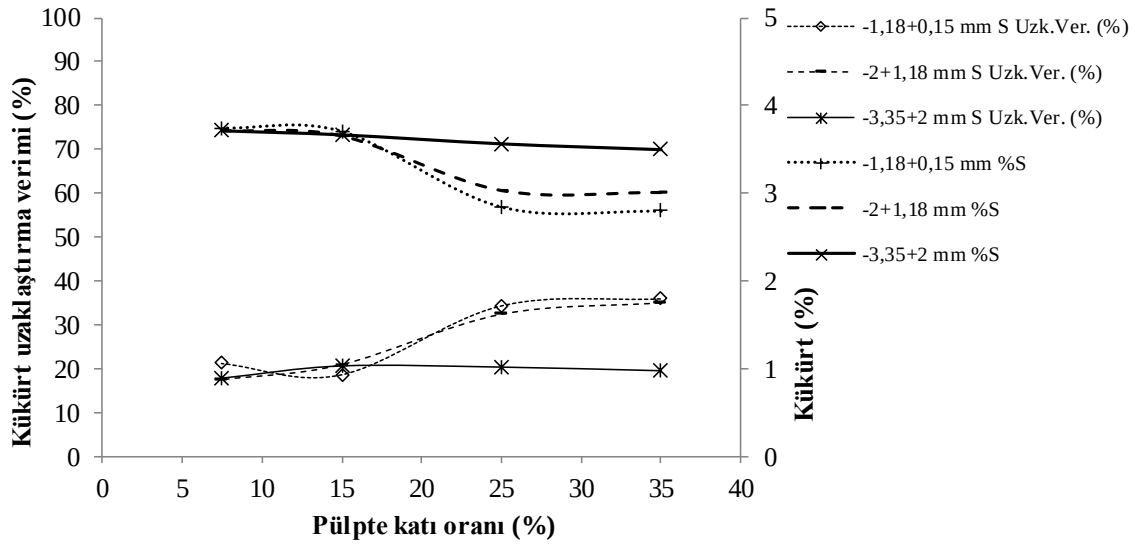


Şekil 4.10. Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.11'den görüldüğü gibi tane boyutunun incelmesine ve piritik kükürt serbestleşmesine bağlı olarak hem lave küllünde azalma, hem de piritik kükürt uzaklaştırma veriminde artış belirlenmiştir. Tüm boyutların birleştirilmesiyle, %3,85 S içeren besleme

linyitinden %29,3 kükürt uzaklaştırma verimiyle %3,17 S içeren lave kazanılmıştır. Buna göre kükürt uzaklaştırma sonuçları göreceli olarak başarılı değildir.

Linyit zenginleştirmede, özellikle gravite ayırımının kullanıldığı yöntemlerde, lavedeki piritik kükürt serbestleşmeye bağlı olarak azaltılabilirken, yapısal kükürt külün uzaklaştırılmasına bağlı olarak yükselmektedir. Bu durum kükürdün göreceli olarak azaltılamamasına engel teşkil etmektedir. Dolayısıyla bünye kükürdünün bulunduğu linyitlerde, yıkamayla birlikte kükürt tenörünün yükseldiği bilinmektedir. Literatürde linyitlerin gravite ile zenginleştirildiği çalışmalarda, bu durum belirtilmektedir (Honaker vd., 2000).

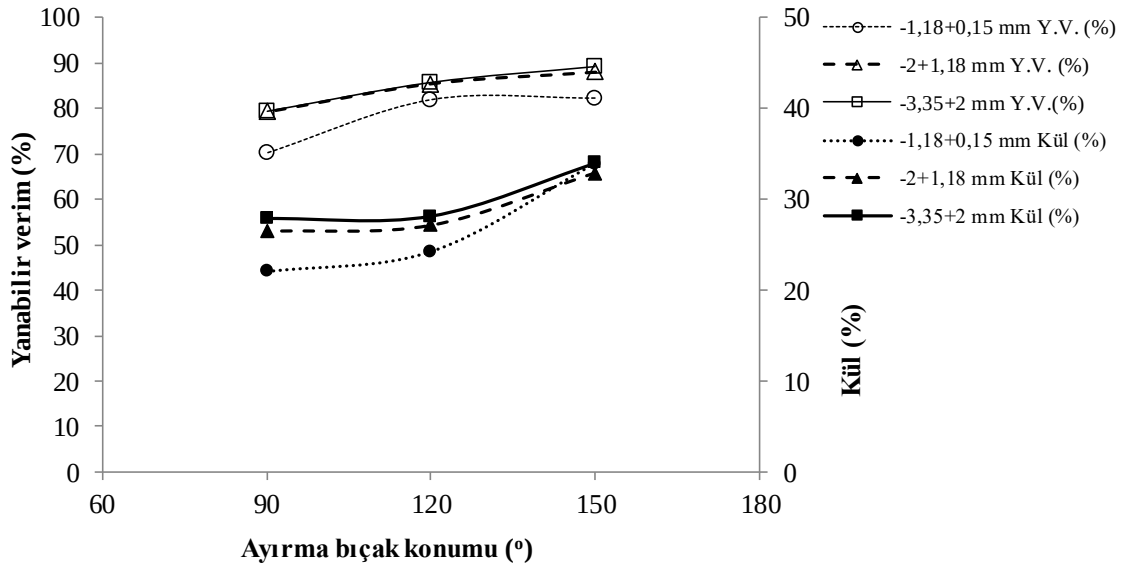


Şekil 4.11. Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

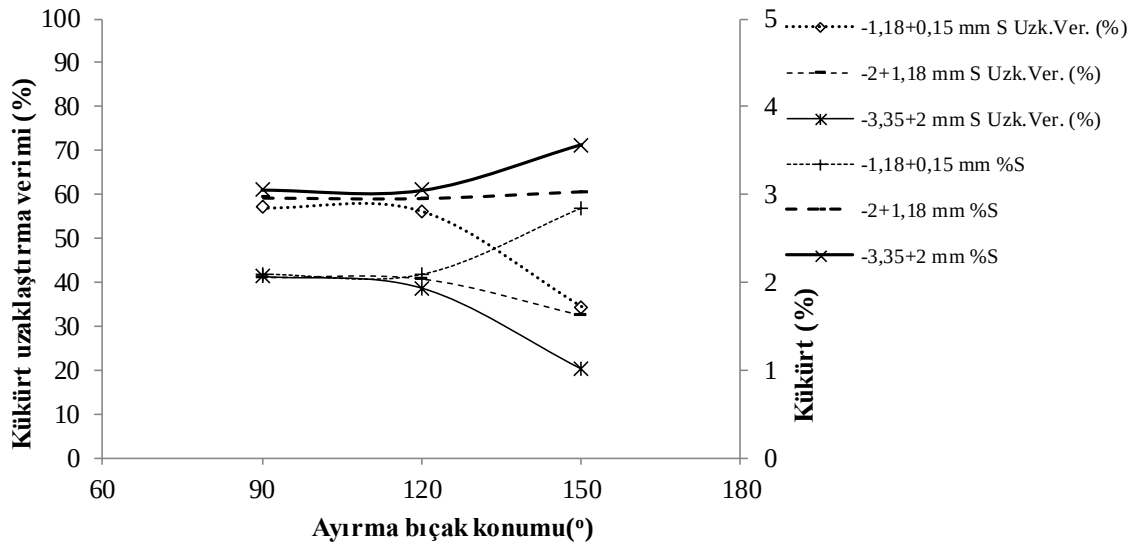
Pülpte katı oranı belirlendikten sonra, konsantre alma bıçak ayarları 90°, 120° olacak şekilde değiştirilerek deneylere devam edilmiştir. Bıçak ayarlarının değişimine göre elde edilen Reichert sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi tüm tane boyutlarında en düşük lave kül değerleri 90°'lik bıçak konumunda olmasına rağmen, düşük yanabilir verimlerinden dolayı 120° bıçak açıklığının seçilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir. Bıçak ayarları konumunun ayırmada önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Lave külleri tüm boyutlarda %24,30 ile %28,16 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar gerçekleştirilen bütün gravite ayırmalarında elde edilen en düşük lave kül değerleridir. Reichert spiralinin ekonomikliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilmesinin yanında, düşük kül değerleri elde edilmesi önemli bir avantajdır. Deneyler sonucunda lave küllerinin birleştirilmesiyle %26,51 küllü lave %87,71 yanabilir verimle kazanılmıştır. Reichert spiral deneylerine ait sonuçlar Ek 6'da verilmiştir.

Şekil 4.13'den görüldüğü gibi kül uzaklaştırmada olduğu gibi kükürt uzaklaştırmada da ayırıcı bıçak konumunun etkili olduğu belirlenmiştir. Ayırıcı bıçak konumunun azalmasıyla tüm boyutlarda hem kükürt içeriğinin azaldığı hem de kükürt uzaklaştırma veriminin arttığı tespit edilmiştir. Tane boyutlarının lavelerinin birleştirilmesiyle, %3,85 S içeren besleme linyitinden %45,4 kükürt uzaklaştırma verimiyle %2,08 S içeren lave kazanılmıştır. Buna göre kükürt uzaklaştırma sonuçlarının göreceli olarak başarılı olduğu kabul edilebilir.



Şekil 4.12. Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %15-25 katı oranlarında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi



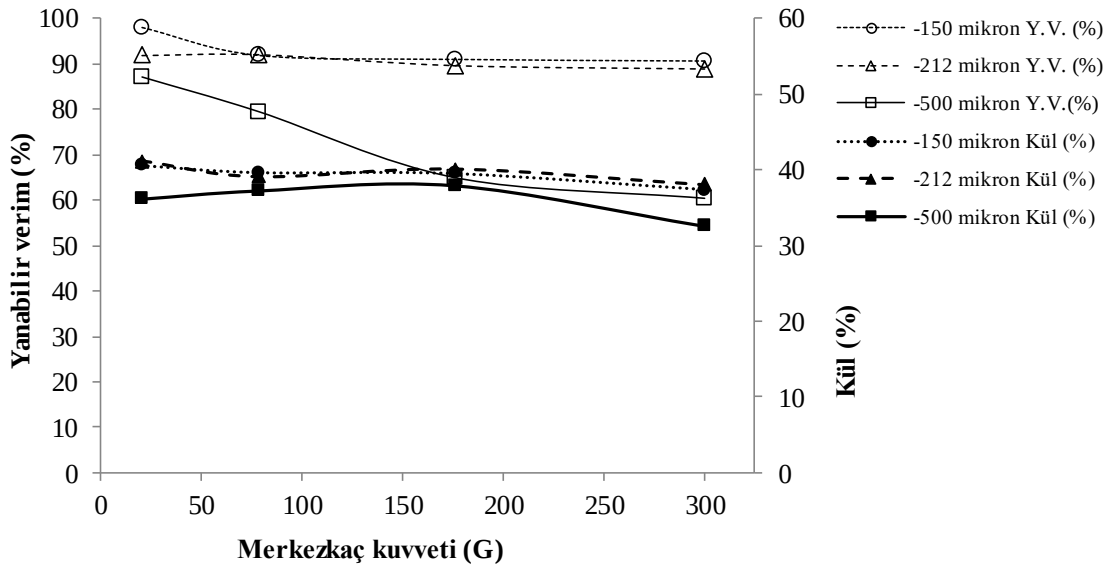
Şekil 4.13. Arguvan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %15-25 katı oranlarında, bıçak konumunun kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

Arguvan linyitinde, kimyasal analiz ve zenginleştirme deney sonuçlarından yaklaşık olarak %50 kadar piritik kükürt ve %50 kadar bünye kükürdü olduğu tahmin edilmektedir. Gravite ayırımlarında serbestleşmeye bağlı olarak piritik kükürdün uzaklaştırılabildiği varsayımından yola çıkılarak, Reichert spirali ile %45,4 kükürt uzaklaştırma verimi elde edilmesi neredeyse piritin tamamının uzaklaştırılabildiği sonucunu akla getirmektedir. Lavedeki %2,69 S içeriğinin ise bünye kükürdünden kaynaklandığı ve gravite ayırmasıyla lavede bulunan bünye kükürdünün daha fazla azaltılamayacağı düşünülmektedir. Buradan Arguvan linyitinin toplam kükürt içeriğinin fiziksel yöntemlerle limit bir değere kadar azaltılabileceği sonucu çıkartılabilir.

4.1.4. Falcon konsantratör deneyleri

Falcon konsantratör deneylerinde -500 μm , -212 μm ve -150 μm olmak üzere 3 farklı tane boyutu ve 20, 78, 176 ve 300 G olmak üzere 4 farklı merkezkaç kuvveti (G) kullanılmıştır.

500 μm , 212 μm ve 150 μm altına indirilen, Arguvan linyitinin merkezkaç kuvvetlerine bağlı olarak gerçekleştirilen Falcon konsantratör deney sonuçları Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. Arguvan linyitinin Falcon konsantratörde tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.14’den görüldüğü gibi, -500 μm tane boyutunda ve 300 G kuvvetinde, %70,36 yanabilir verimle besleme külü %37,77’den %32,57’ye düşürülmüştür. %97,1 ile yanabilir verimin en yüksek olduğu 20 G kuvvetinde ise %36,14 küllü lave alınmıştır. Ancak -500 μm tane boyutunda çalışılan tüm G kuvvetlerinde yeterli bir kül ayırımı yapılamadığı tespit edilmiştir. Serbestleşmenin ayırım verimine etkisini görebilmek amacıyla daha ince boyutlar olan -212 μm ve -150 μm tane boyutlarında Falcon deneylerine devam edilmiştir. -212 μm tane boyutuyla

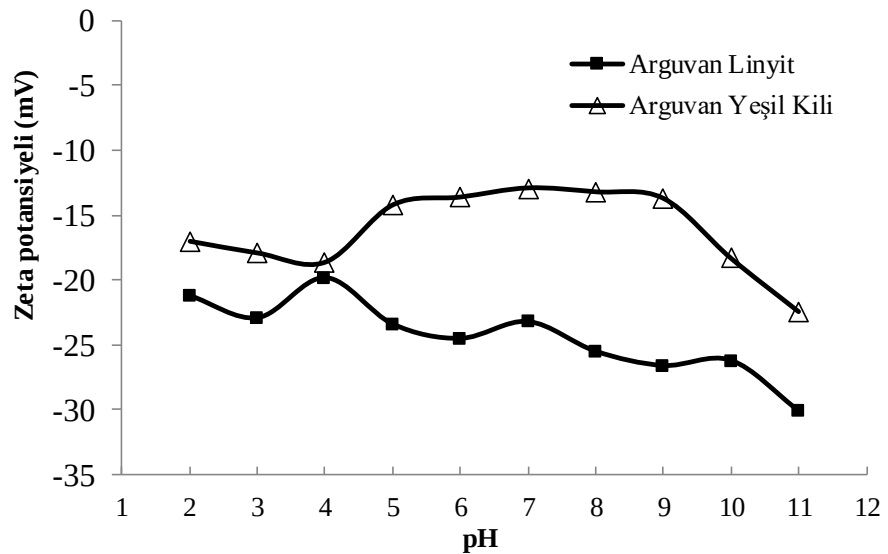
Çalışılan tüm G kuvvetlerinde kl içerikleri %38,1 ile %41,11 arasında değişmektedir. Elde edilen bu sonuçlar tane boyu incelidikçe, kil minerallerinin laveye kaçtığını ve dolayısıyla ayırımın gerçekleşmediğini göstermektedir. Arguvan linyitinin 150  m boyutunun altına indirilmesi ile gerçekleştirilen Falcon konsantratör deneyleri de önceki deneylerle benzerlik göstermektedir. Kl azaltma açısından çok ince boyuttaki killerin st akıma kapılarak laveye kaçması nedeniyle, istenen başarı elde edilememiştir. Falcon deneylerine ait sonuçlar Ek 7’de verilmiştir.

Tez çalışmasında hedef, Arguvan linyitinin kl içeriğini azaltmak olduğundan, Falcon konsantratörün bu amaca cevap veremediği görülmektedir. Falcon konsantratör sonuçlarının, literatürdeki kömür çalışmalarıyla uyum içerisinde olduğu da burada belirtilmelidir (Can vd., 2010; Oruç vd., 2010; Boylu 2013; Boylu 2014). Buna karşılık Falcon konsantratör ile sert linyitlerden piritik kükürt uzaklaştırmanın başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir (Honaker, 1996; Honaker vd., 1998; Honaker vd., 2000; Tao vd., 2006; İbrahim vd., 2014).

Falcon konsantratörden elde edilen lavelerin toplam kükürt içeriklerinin %3,76-3,80 arasında değişmesinden dolayı, kükürt uzaklaştırmanın aksine kükürt içeriğinin değişmediği tespit edilmiştir. Bu durum Falcon konsantratörü ile kükürt uzaklaştırmanın başarılı olmadığını göstermiştir.

4.1.5. Flotasyon deneyleri

Flotasyon ncesinde Arguvan linyiti ve linyitle beraber bulunan montmorillonitin ($Al_4SiO_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$) yüzey yükü davranışlarını belirlemek amacıyla zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. pH’a bağlı olarak ölçülen zeta potansiyeli sonuçları şekil 4.15’de verilmiştir.

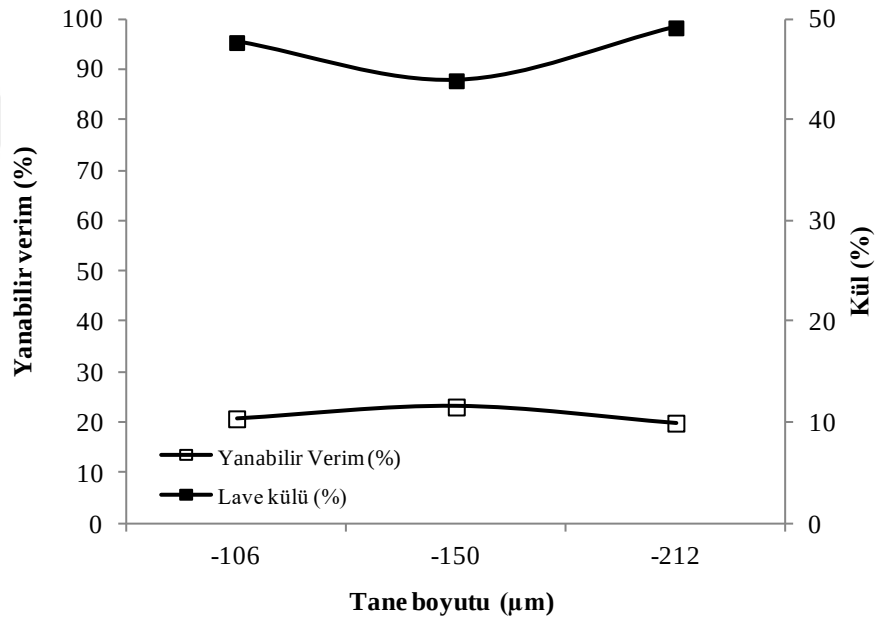


şekil 4.15. Arguvan linyiti ve kilinin pH’a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri

Yüzey yükü sonuçlarında kilin daha negatif çıkması beklenirken, linyitin daha fazla negatif yüzey yüküne sahip olduğu belirlenmiştir. Yüzey yükü sonuçları Dinçer vd. (1990)'nin seçimli aglomerasyon yapmak amacıyla ölçtüğü yüzey yükü sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla bu sonuçlara göre Arguvan linyitinin flotasyonunun çok zor hatta mümkün olmadığı gibi bir yargıya varılabilir.

Flotasyon deneyleri -212 μm , -150 μm ve -106 μm olmak üzere 3 farklı boyutta gerçekleştirilmiştir. Oksitlenmeden kaynaklanabilecek hidrofilikliği azaltmak amacıyla, öğütme deneyden hemen önce yapılmış ve yeni yüzeylerin oluşması sağlanmıştır. Flotasyonda pülpte katı oranı %20, pervane hızı 1400 dev/dk, pH :7, 1000 g/ton Na_2SiO_3 bastırıcı, 150 g/ton MIBC köpürtücü miktarı sabit tutulmuştur. Flotasyon deneylerinde 2000 g/ton gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot karışımı toplayıcı olarak kullanılmıştır. Pülp 3 dakika karıştırıldıktan sonra, 3 dakika bastırıcı ve 3 dakika toplayıcı ile koşullandırılmış ve 6 dakika süreyle köpük alınmıştır.

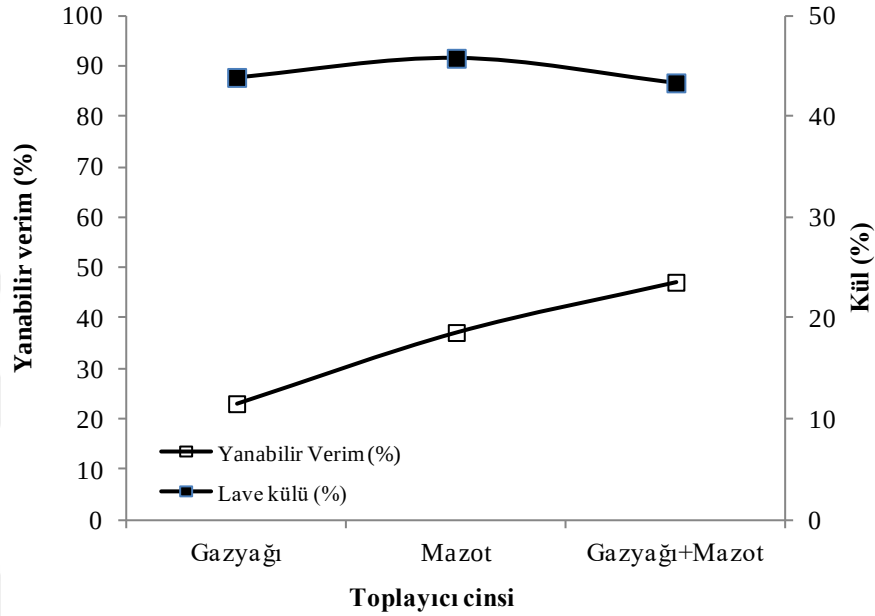
Arguvan linyitinin tane boyutu ve toplayıcı türü ile yapılan flotasyon deney sonuçları Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Flotasyon deneylerine ait sonuçlar Ek 8'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Arguvan linyitinin gazyağı ile flotasyonunda, tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'den görüldüğü gibi Arguvan linyitinin flotasyonunun bu şartlar altında mümkün olmadığı belirlenmiştir. Flotasyonun başarılı olamaması, petrografik analizde elde edilen bulgulara göre, Arguvan linyitinin mineral madde içeriğinin çok ince dağılımlı (sinjenetik/bünye külü) olması ve karbominerit miktarının yüksekliği ile açıklanabilir.

Abakay Temel ve Majumder (2016), Arguvan linyiti ile optimum olarak belirledikleri şartlarda (%10 katı oranı, 1800 dev/dk pervane hızı, köpürtücü olarak 0,5 kg/ton çam yağı, toplayıcı olarak 7,5 kg/ton %80 gazyağı+ %20 mazot karışımı kullanarak pH 7’de) yaptıkları flotasyon deneyi sonucunda, %35,11 kül içeren beslemeden %72,32 yanabilir verimle %27,86 kül içeren lave kazanmışlardır. Dolayısıyla, kül içeriğinin azaltılması göreceli olarak başarılı olmamıştır.

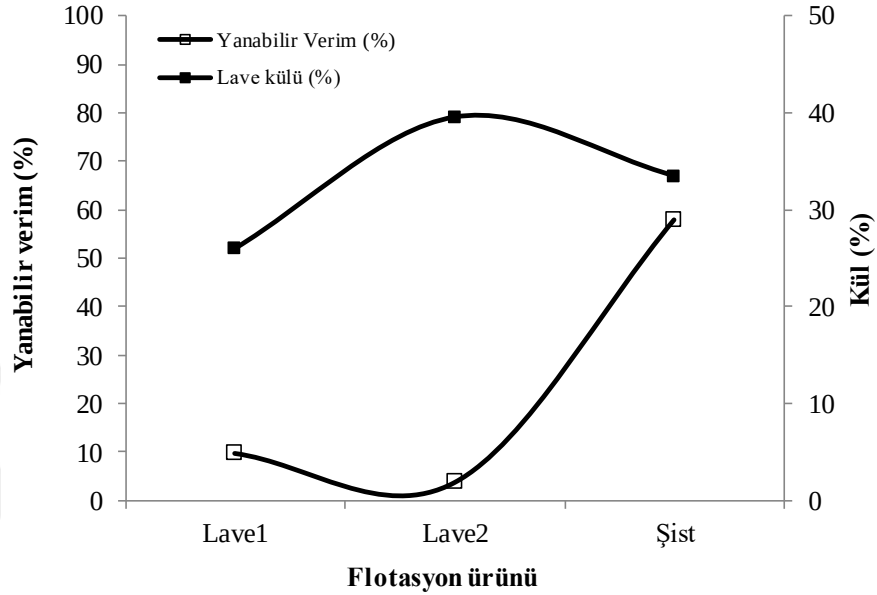


Şekil 4.17. -150 µm boyutlu Arguvan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi

Flotasyon deney başarısızlığını tespit etmek amacıyla şlam atılarak deneylere devam edilmiştir. 150 mikron boyutuna öğütülen linyitin, flotasyon öncesi 38 mikron altı elek ile atılarak gerçekleştirilen flotasyonda, ilk 3 dakika alınan Lave1 (%25,91 kül) ve ikinci 3 dakikada alınan Lave2 (%39,48 kül) ve Şist (%33,44 kül) ürünlerin sonuçları Şekil 4.18’de gösterilmiştir.

Arguvan linyitinin şlam atılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarında Lave 1 %25,91 kül ve %9,75 yanabilir verimle, Lave 2 %39,48 kül ve %3,72 yanabilir verimle ve şist ise %33,44 kül ve %58,01 yanabilir verimle elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi linyitin en uygun şartlar sağlanarak da yüzmediği belirlenmiştir (Şekil 4.18). Linyitlerin yüksek oksijen içerikleri, oksidasyon hassasiyetlerinin yüksek olması, yan kayaç ile yüzey özellik farklılıklarının az olması veya olmaması gibi nedenlerle çok zor yüzebildiği veya yüzmediği literatürde Tunçbilek linyiti ile çalışan Sivrikaya (2014), Gölbaşı linyiti ile çalışan Temel vd. (2010), Beypazarı, Gölbaşı ve Kangal ile çalışmış olan Ceylan ve Küçük (2004)’ün çalışmalarında da görülmektedir. Flotasyon ile ilgili daha ayrıntılı çalışmaların yapılması gerektiği açıktır.

Isıl işlem görmüş linyitin yüzeylerinde hidrofobik yüzey artışı olup olmadığını görebilmek amacıyla, pirolizle elde edilen çar ürünün flotasyonu da denenmiştir. Çar ürünün flotasyon lavesi %54,51 kül ve %12,68 yanabilir verimle alınmıştır. Dolayısıyla çar ürünün de flotasyona olumlu sonuç vermediği tespit edilmiştir.



Şekil 4.18. Arguvan linyitinin şlam atılarak gerçekleştirilen flotasyon sonuçları

4.1.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması

Zenginleştirme işlemlerinde amaç, daha kaliteli piroliz ve sıvılaştırma ürünleri elde etmektir. Bu amaca yönelik olarak gerçekleştirilen tüm zenginleştirme deneylerinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmektedir.

Zenginleştirme sonuçlarını toplu halde gösteren Çizelge 4.3’e göre, kül ve toplam kükürt giderimi açısından gravite zenginleştirme yöntemlerinin tamamı flotasyona göre daha olumlu sonuç vermiştir. Gravite yöntemlerinin kendi içerisinde karşılaştırılması yapıldığında ise Reichert spiralinin en iyi kül ve kükürt giderimine sahip olan yöntem olduğu tespit edilmiştir. Yanabilir verim açısından ise yöntemler arasında yüzdürme-batırma testleri haricinde belirgin bir farklılık (%73,72-%79,63) olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla zenginleştirmede amaç kül ve kükürdü azaltarak piroliz yöntemine malzeme hazırlamak olduğundan, nihai hedefe yönelik olarak Reichert spiralinin seçilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 4.3. Arguvan linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması (havada kuru bazda)

Zenginleştirme yöntemleri	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Toplam kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	AID (kcal/kg)
*Yüzdürme-batırma testleri (1,7 g/cm ³ de yüzen)	28,42	87,42	2,64	50,57	3780
*Sallantılı masa	26,27	79,63	2,54	46,36	4192
*Reichert spirali	26,51	77,71	2,08	56,23	4180
*Falcon konsantratör	36,10	73,72	3,76	16,99	2790
Flotasyon	43,37	47,18	3,83	24,92	1884
İşleme girmeyen (-0,15 mm)	59,48	6,38	4,52	-	Okunamadı
Arguvan linyiti	37,77	100	3,85	-	2576

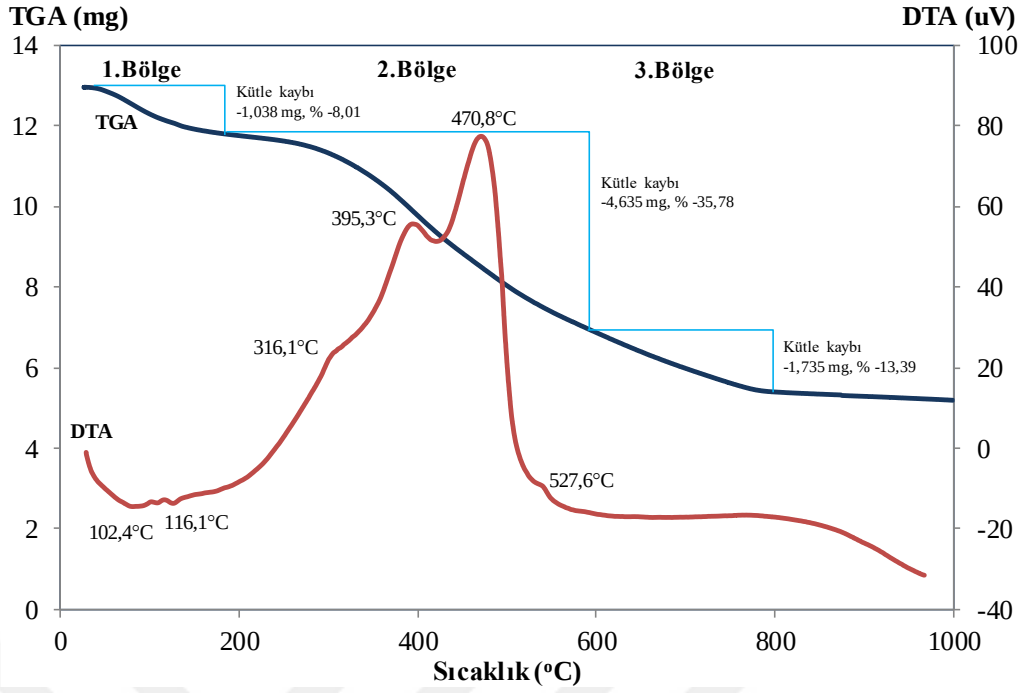
* Birleştirilmiş tane boyutlarına göre hesaplanmıştır.

4.1.7. Piroliz deneyleri

Zenginleştirme yönteminin piroliz ürünlerinin verimine etkisini belirlemek amacıyla önce tüvenan linyit örnekleri, daha sonra ise en iyi zenginleştirme ürününün piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz deneylerinde, optimum tane boyutu, piroliz sıcaklığı ve süresinin etkisi test edilmiştir. Piroliz deneylerine ait sonuçlar Ek 9'da verilmiştir.

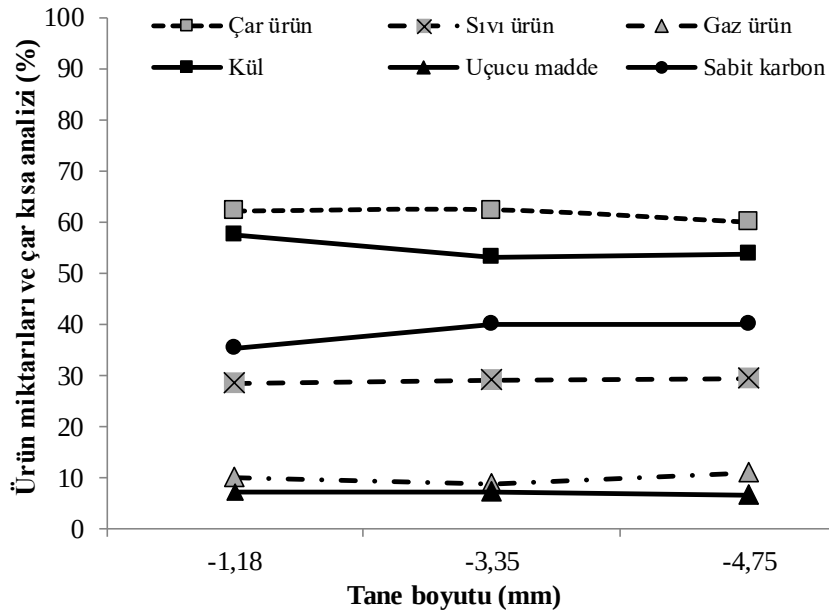
Piroliz deneyleri inert azot (N₂) gazı ortamında gerçekleştirildiğinden, Arguvan linyitinin azot atmosferindeki termogravimetrik analiz (DTA-TGA) değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir.

Şekil 4.19'daki DTA eğrisinde 3 bölge görülmektedir. Termogram (DTA) eğrisinde yaklaşık 102°C ve 116°C'de görülen bünye nemi ve CO₂ uzaklaşmasına bağlı olan pikler 1.bölgeyi, 316°C'de başlayıp 471°C'de sona eren uçucu madde çıkışı 2.bölgeyi, karbonat (CO₃) parçalanma başlangıç sıcaklığı olan 528°C'deki pik ise 3.bölgeyi göstermektedir. Shi vd. (2013), 300-400°C arasında DTA grafiklerinde görülen piklerin alifatik yapıdaki karbon-oksijen, kükürt-azot ve kükürt-kükürt arasındaki bağların kopmasından, 400-500°C arasında görülen piklerin alifatik yapıdaki karbon-karbon, oksijen-hidrojen ve aromatik yapıdaki karbon-azot bağlarının kopmasından ve 500-600°C arasındaki piklerin ise aromatik karbon ve alifatik yapıdaki karbon bağları ile oksijen-kükürt bağlarının kopmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 4.19. Arguvan linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

Piroliz için en uygun tane boyutunu belirlemek amacıyla, kömür numunelerinin tamamı 4,75 mm, 3,35 mm ve 1,18 mm tane boyutlarının altına indirilerek, 200 ml/dk N₂ gazı akışında, 3°C/dk ısıtma hızıyla, 500°C'de 30 dakika süreyle piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arguvan linyitinin piroliz deneylerinin tane boyutuna göre ürün verimi değişimleri ve kısa analiz sonuçları Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

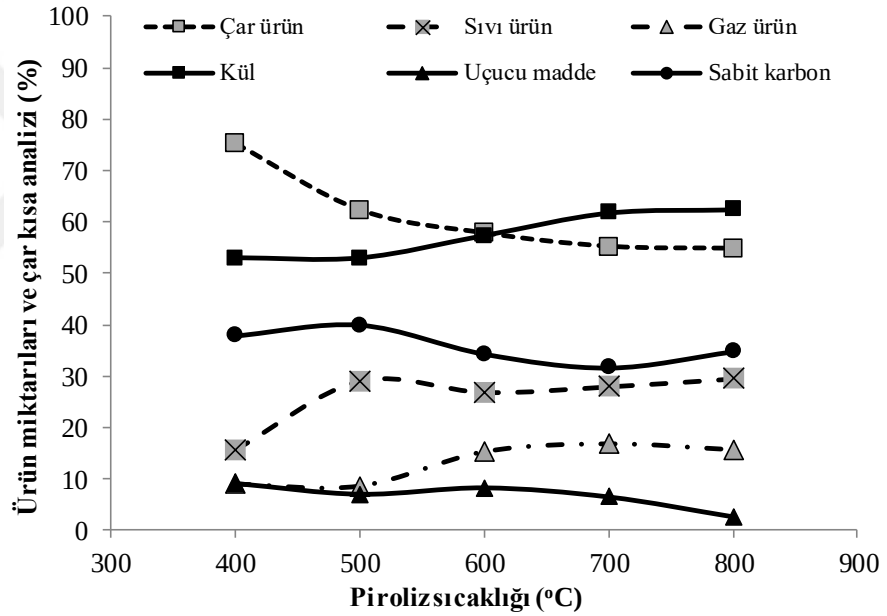


Şekil 4.20. Arguvan linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi

Şekil 4.20 incelendiğinde, Arguvan linyiti için en uygun tane boyutunun -3,35 mm olduğu belirlenmiştir. Bu boyutta %62,25 çar, %29,13 sıvı ve %8,62 gaz verimi elde edilmiştir. Beslemenin külü %37,77 iken çarın külü %53,01'e, sabit karbonu ise %28,61'den %40,15'e yükselmiştir. Bundan sonraki aşamalarda piroliz tane boyutu olarak 3,35 mm altı kullanılmıştır.

-3,35 mm tane boyutunda, optimum sıcaklığı belirlemek amacıyla 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C'lerde piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz sıcaklığına ait deney sonuçları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Şekil 4.21'de Arguvan linyiti için piroliz sıcaklık artışına bağlı olarak, çar verimi azalırken, sıvı ve gaz ürün verimleri artış göstermiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir (Saydut vd., 2010; Wei vd., 2012; He vd., 2015; Lievens vd., 2013; Li vd., 2015).

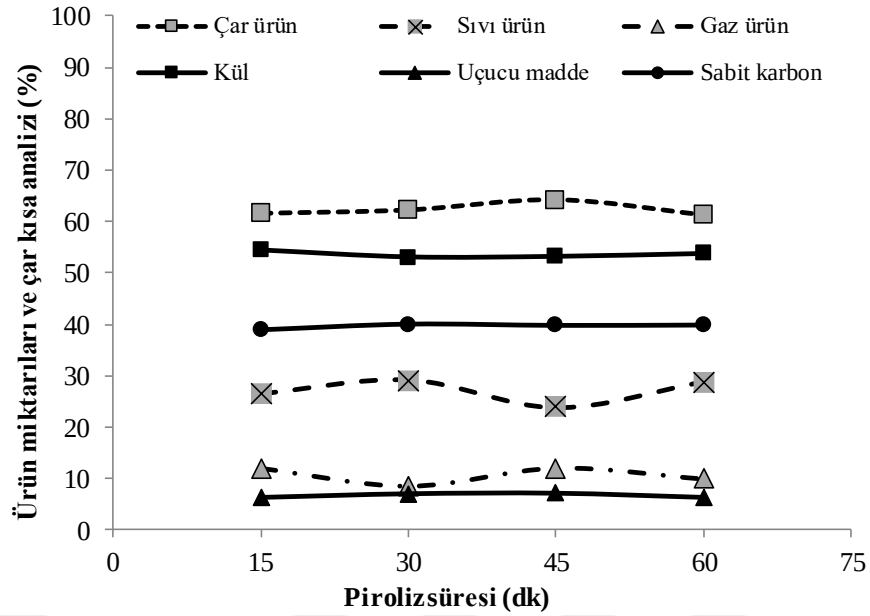
Çar verimi ve buna bağlı olan sabit karbon içeriğinin yüksek olduğu ve nispeten çar ürünün külünün az olduğu 500°C piroliz sıcaklığının optimum olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.21. Arguvan linyitinin -3,35 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi

Fırın 500°C'ye ulaştıktan sonra 15, 30, 45 ve 60 dakika süreyle bekletilen numunelerin piroliz deney sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Şekil 4.22'den Arguvan linyitinin 500°C'de yapılan piroliz deneylerinde süre açısından 30 dakika ve 45 dakika kıyaslandığında, çar ürünün veriminin daha yüksek olması nedeniyle 45 dakikanın seçilmesi uygun görülmüştür. Ancak 45 dakika ve 30 dakika piroliz süresinde çar ürünün kül ve sabit karbon içeriği arasında önemli bir değişiklik görülmediğinden, ekonomik açıdan değerlendirildiğinde 30 dakika piroliz süresinin de seçilmesinin uygun olabileceği düşünülmüştür.

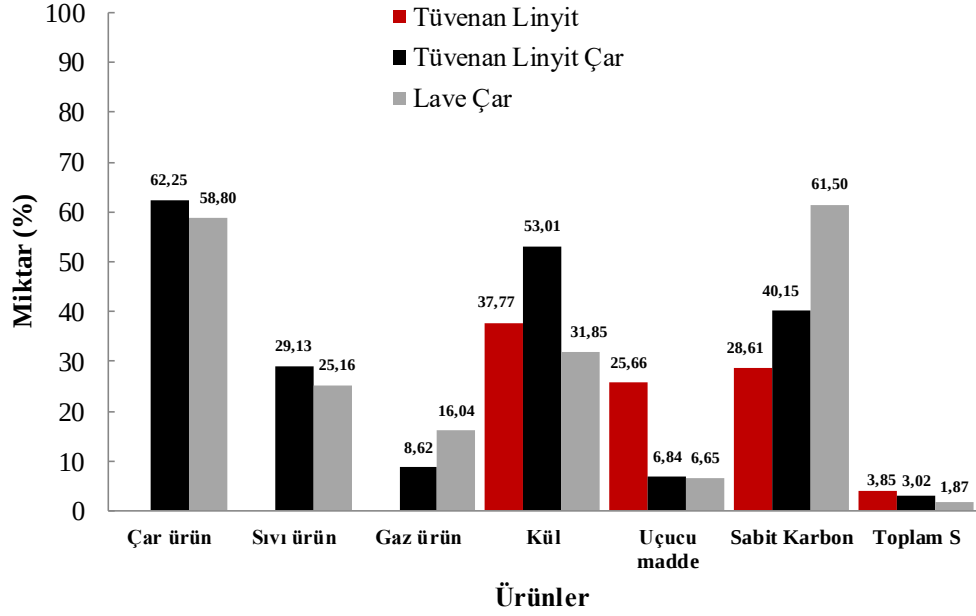


Şekil 4.22. Arguvan linyitinin -3,35 mm tane boyutunda ve 500°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi

Piroliz deneyleri sonucunda, Arguvan linyiti için -3,35 mm tane boyutu, 500°C piroliz sıcaklığı ve 45 dakika piroliz süresinin optimum piroliz şartları olarak alınmasına karar verilmiştir.

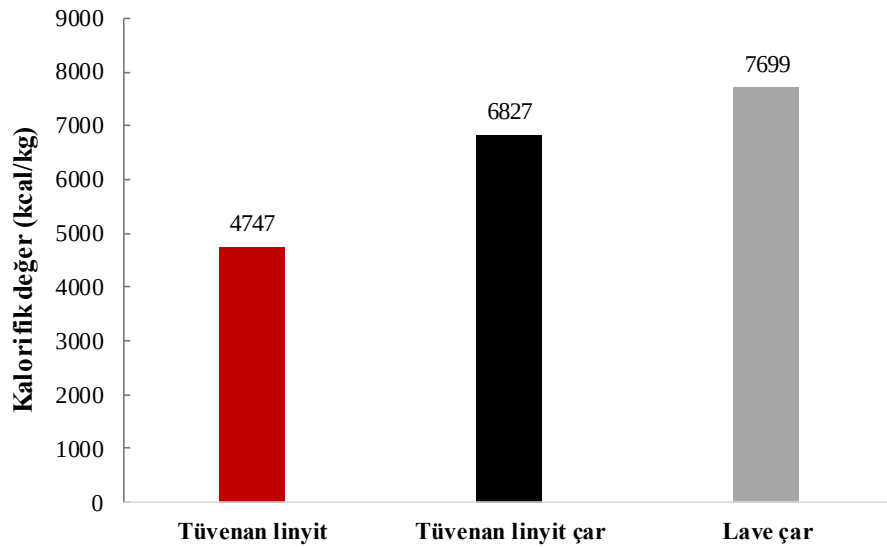
Doktora tez çalışmasının esası olan zenginleştirme yönteminin piroliz ürünlerine etkisini belirlemek amacıyla, Reichert spiralinden elde edilmiş lavenin, belirlenen optimum çalışma şartlarında piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz deneylerinin tüvenan linyite göre karşılaştırılması Şekil 4.23’de, kalorifik değerler ise Şekil 4.24’de verilmiştir.

Şekil 4.23’den Arguvan linyitinin Reichert spirali lavesiyle yapılan piroliz deneylerinde, tüvenan Arguvan linyitine göre piroliz ürünlerinde belirgin bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Lave ürün pirolizi sonucunda tüvenan ürüne göre, çar ürün veriminde %3,45 ve sıvı ürün veriminde %3,97 azalma olduğu belirlenmiştir. Gaz ürün verimi ise %7,42 oranında bir artış göstermiştir. Çar ürünün kısa analizi karşılaştırıldığında ise zenginleştirmenin oldukça faydalı olduğu açıkça görülmektedir. Buna göre çar ürünün kısa analizinde küll içeriği %53,01’den %31,85’e azalırken, sabit karbonun %40,15’den %61,50’ye yükseldiği belirlenmiştir. Kalorifik değerde ise tüvenan Arguvan linyitinin pirolizi sonucunda elde edilen çar ürünün kalorifik değeri kuru-külsüz bazda 6827 kcal/kg iken, lave ürünün pirolizi sonucunda kalorifik değer 7699 kcal/kg’a kadar yükselmiştir. Bu durumda kalori değerinde 872 kcal/kg’lık bir artış hesaplanmıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.23. Tüvenan Arguvan linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri

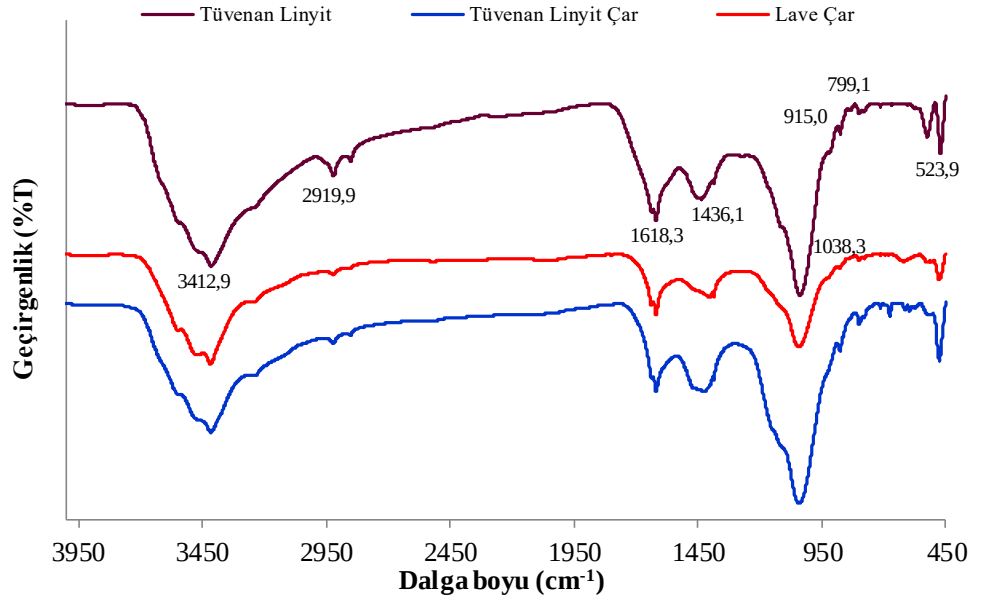
Arguvan linyitinin tüvenan ve lave halde piroliz edilmesiyle çar üründe sırasıyla %3,02 S ve %1,87 S elde edilmiştir. Tüvenan linyitin toplam kükürt içeriği %3,85 ve kalorisinin 4747 kcal/kg olduğu düşünülürse, tüvenan ve piroliz ürünlerin her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,81 %S/1000 kcal, 0,44 %S/1000 kcal ve 0,24 %S/1000 kcal olarak hesaplanır. Bu sonuç ve kısa analiz sonuçları, piroliz sonucu elde edilen çar ürünün dumansız yakıt olarak kullanılmasını teorik olarak mümkün hale getirmiştir. Piroliz deney sonuçlarından zenginleştirmenin piroliz ürünlerinin verimine belirgin bir şekilde olumlu yönde etki ettiği belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Tüvenan Arguvan linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri (kuru-külsüz bazda)

Piroliz deneylerinin sonuçlarının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla, Arguvan linyitine ait tüvenan linyit, tüvenan piroliz ve lave pirolizinden elde edilen çar ürünlerin FTIR analiz sonuçları Şekil 4.25’ de gösterilmiştir.

Şekil 4.25 incelendiğinde, tüvenan linyitte kaydedilen 2920 cm^{-1} civarındaki alifatik yapıya ait karakteristik C-H piklerinin tüvenan ve zenginleştirilmiş çar ürünlerde şiddetinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum piroliz işlemi sırasında birçok C-C bağı bozularak parçalandığına işaret etmektedir. Piklerin şiddetindeki azalmanın uçucu madde çıkışına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Si-O-Al/Fe/Ca/Mg vb. gerilmelerinin artmasıyla birlikte, 1038 cm^{-1} pikinin şiddetinin zenginleştirilmiş çar üründe azaldığı görülmektedir. Bu pik, yapı içerisindeki silisli ve inorganik maddeleri gösteren bantlardır. FTIR spektrumları lavenin pirolizi sonucunda beklendiği gibi, uçucu maddelerin ve safsızlık olarak bulunan kül yapıcı içeriklerin azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.25. Arguvan linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerinin FTIR analiz sonuçları

Piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliğini tespit etmek amacıyla, optimum şartlarda deneyler 2 kere daha tekrarlanmıştır. Tekrarlanan piroliz deney sonuçları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Arguvan linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri

(%)	Çar ürün	Sıvı ürün	Gaz ürün	Kül	Uçucu madde	Sabit C
Tüvenan kömür	62,25	29,13	8,62	53,01	6,84	40,15
Tüvenan kömür 1. Tekrar	61,94	29,25	8,81	52,94	6,71	40,35
Tüvenan kömür 2. Tekrar	62,23	29,18	8,59	53,16	6,78	40,06
Lave kömür*	58,80	25,16	16,04	31,85	6,65	61,50
Lave kömür 1. Tekrar*	58,67	25,37	15,96	32,22	5,89	61,89
Lave kömür 2. Tekrar*	58,90	25,43	15,67	31,97	6,33	61,70

*Beslemeye göre

Çizelge 4.4'den görüldüğü gibi tekrarlanabilirlik test sonuçları, optimum piroliz sonuçları ile çok iyi uyum içerisinde. Bu sonuçlara göre piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliklerinin yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

4.1.8. Sıvılaştırma deneyleri

Arguvan tüvenan linyit ve Reichert spirali lavesinin sıvılaştırma deneylerinden elde edilen ürünlerin kısa analizi Çizelge 4.5' de verilmiştir. Tetrahidrofuran (THF, C_4H_8O) ile yıkanan katı kalıntı (çar), vakum koşullarında kurutulduktan sonra tartılarak çar verimleri belirlenmiş ve kül içerikleri analiz edilmiştir. Çizelge 4.5'den tüvenan linyitte %28,61 olan sabit karbon miktarına oranla çar ürünlerin karbon miktarlarında belirgin bir artış olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.5'den sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan linyitin katı kalıntısında 8175 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin katı kalıntısında 8389 kcal/kg; tüvenan linyitin preasfalteninde 8319 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin preasfalteninde 8549 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4400 kcal/kg iken zenginleştirilmiş linyitin yağ üründe ise 4638 kcal/kg olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. Tüvenan Arguvan linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri

	Tüvenan linyit çarı	Lave linyit çarı
Kısa analizler (%)		
Kül	20,11	10,88
Uçucu madde	27,03	23,81
Sabit karbon*	52,86	65,31
Elementel analiz (%) (kuru-külsüz bazda)		
C	54,16	66,75
H	4,39	4,52
N	1,39	1,30
S	2,92	2,03
O*	37,14	25,40
Kalorifik değer (kcal/kg) (kuru-külsüz bazda)		
Katı kalıntı (çar)	8175	8389
Preasfalten	8319	8549
Yağ	4400	4638

*Fark ile

Sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Asfalten örneklerinin cam sistemlerden uzaklaştırmasının verdiği zorluk ve madde miktarının az olmasından dolayı elementel analizleri ve kalorifik değerleri tespit edilememiştir.

Çizelge 4.6. Arguvan linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları

	Tüvenan Arguvan linyitinin preasfaltene	Zenginleştirilmiş Arguvan linyitin preasfaltene	Tüvenan Arguvan linyitinin yağı	Zenginleştirilmiş Arguvan linyitinin yağı
C	69,02	73,28	70,30	82,13
H	5,44	6,57	7,54	8,15
N	1,21	1,33	0,42	0,33
S	1,05	0,78	0,44	0,28
O*	23,28	18,04	21,30	9,11

* Fark ile

Çizelge 4.7’de Arguvan tüvenan linyiti ve zenginleştirilmiş linyitin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen ürünlerin verimleri ve toplam dönüşümler verilmiştir. Çizelge 4.7’den zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerden asfaltan verimi değişmezken, preasfaltan ve yağ+gaz verimlerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. Arguvan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri

(%)	Çar verimi	Preasfaltan	Asfaltan	Yağ+gaz	Toplam dönüşüm
Arguvan tüvenan çarı	52,43	8,87	8,33	30,37	47,57
Arguvan lave çarı	43,15	14,18	8,32	34,55	56,85

Kömür sıvılaştırılmasının temel amacı yeni bir sıvı yakıt ve kimyasal hammadde üretebilmektir. Hem petrole alternatif bir sıvı yakıt olarak değerlendirilebilmesi, hem de temel kimyasal hammadde üretimi için uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, sıvılaştırma ürünü olarak elde edilen yağların nicel ve nitel analizleri GC-MS analizi ile yapılmıştır. Tüvenan ve zenginleştirilmiş linyit örneklerine ait GC-MS sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8’den görüldüğü gibi literatüre uygun olarak, Arguvan linyitinin katalitik olmayan koşullarda ve çözücü olarak tetralin kullanılarak sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağların önemli ölçüde, azulen ve türevleri, naftalin ve türevleri, bütildihidroksitoluen gibi hidrokarbon bileşiklerinden oluştuğu belirlenmiştir (Methakhup vd., 2007; Karaca ve Koyunoğlu, 2010b; Wang vd., 2013). Zenginleştirildikten sonraki kömür sıvısında, tüvenan kömür sıvısında var olmayan dimetilbenzaldehit ve propandinitril gibi bileşikler belirlenmiştir. Ancak bu bileşiklerin toplamdaki bollukları yaklaşık %1 civarındadır.

Buna göre, zenginleştirme işleminin sıvı ürün bileşiminde önemli bir etkisinin olmadığı, buna karşılık preasfaltan ve yağ+gaz verimlerinde artış olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.7). Ancak teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğinin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

Çizelge 4.8. Arguvan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürününün GC-MS analiz sonuçları

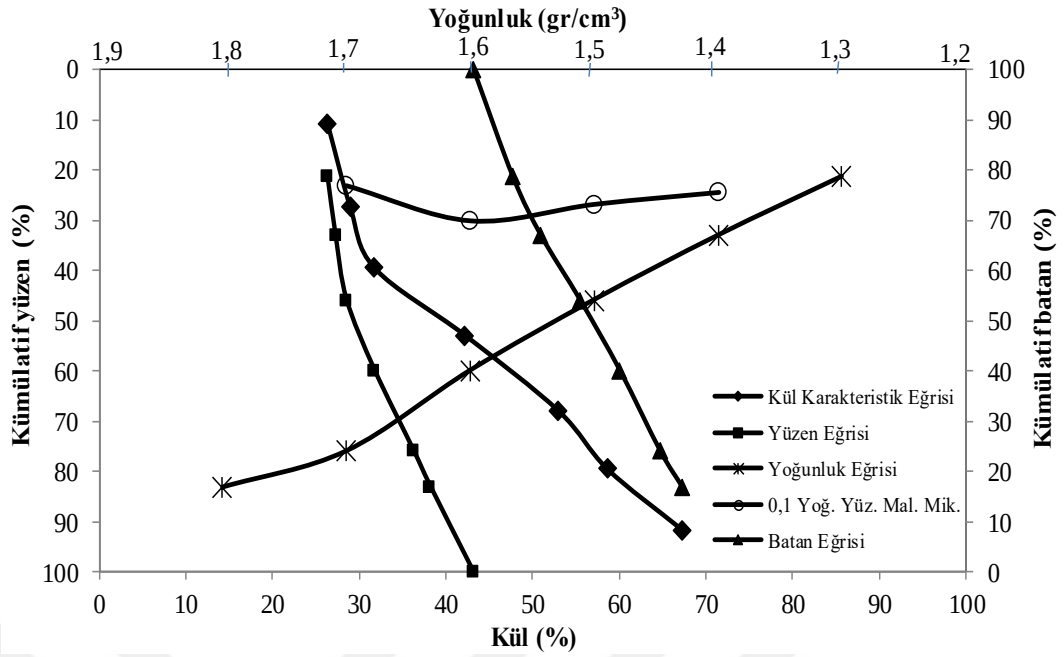
Tutulma süresi (dk)		Muhtemel bileşik adı		Toplamdaki miktar (Bolluk %)	
Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave
7,114	7,112	Toluen	Toluen	2,22	3,62
25,491	25,520	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	59,33	57,73
27,528	27,528	2-Etilin, 2-Etil-2,3-Dihidro-1-H-Indan,2-Etil indan,2-Etilindan	2-Etilin, 2-Etil-2,3-Dihidro-1-H-Indan,2-Etil indan,2-Etilindan	0,61	0,62
31,287	31,293	Azulen	Azulen	31,36	27,81
32,632	31,628	Naftalin	Naftalin		
35,619	35,625	Naftalen,1,2,3,4-tetrahidro-1-propil	Naftalen,1,2,3,4-tetrahidro-1-propil	0,84	0,86
37,215	37,221	Naftalin, 2-metil-	Naftalin, 2-metil-	0,46	0,42
38,394	38,406	Naftalin, 1-metil-	Naftalin, 1-metil-		
62,770	62,776	Naftalin, 2-metil-	Naftalin, 1-metil-	1,16	0,90
68,440	68,452	Naftalin, 1-metil-	Naftalin, 2-metil-		
88,639	78,826	Butilhidroksi tolüen	Butilhidroksi tolüen	1,67	2,39
-	88,656	Benzen,1,3-Dietil-5-Metil	Benzen,1,3-Dietil-5-Metil	0,44	0,35
-	93,771	Benzen,1-etinil	Propandinitril,	1,44	1,37
		2-Metil	2-Metil	1,32	1,19
			2,2'-Binaftalen		1,06
			Dimetil benzaldehit		1,04

4.2. Kangal Linyiti

4.2.1. Yüzdürme-batırma deneyleri

Yüzdürme-batırma testleri için havada kuru kömür örneği -31,5+19 mm, -19+4,75 mm ve -4,75+0,5 mm olmak üzere 3 boyut grubuna ayrılmıştır. Bu boyutlarda batan ve yüzen kömürlerin hesapla birleştirilmesi ile elde edilen Kangal linyitine ait yüzdürme-batırma eğrileri Şekil 4.26'da gösterilmiş ve deney sonuçları Ek 4'de verilmiştir.

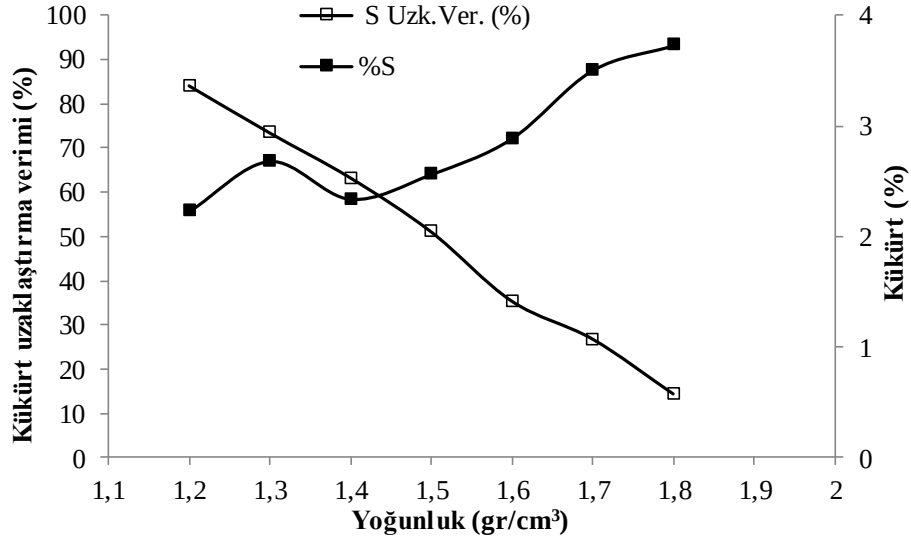
$\pm 0,1$ yoğunlukta yüzen malzeme miktarına göre, $1,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta 23,2 olan bu değer linyitin yıkanabilirliğinin çok zor olduğunu göstermektedir. Yine kül karakteristik eğrisi de yukarıdan aşağıya doğru yavaş yavaş külü artarak inmiş ve yaklaşık $1,68 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta bir bükülme göstermiştir. Dolayısıyla Kangal linyitinin dar tane boyutunda, çok kontrollü olarak yıkanması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.26. Kangal linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

Kangal linyitinin ve birlikte bulunan kilin piknometre ile gerçekleştirilen yoğunluk analizinde sırasıyla $1,81 \text{ g/cm}^3$ ve $2,34 \text{ g/cm}^3$ bulunan özgül ağırlık değerlerinden elde edilen konsantrasyon kriteri (k) değeri 1,65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre ayırım zordur ancak 1 mm'ye kadar serbestleşme boyutuna bağlı olarak çeşitli gravite yöntemleri uygulanabilir (Önal, 1980). Kangal linyitinin yumuşak linyit olması bu değerlendirmelerin doğruluğunu ve literatür ile uyumunu desteklemektedir (Ceylan ve Küçük, 2004).

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen yüzen ürünlerin yoğunluğa bağlı olarak kükürt uzaklaştırma verimi değişimi Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Şekil 4.27'den görüldüğü gibi yıkama yoğunluğu arttıkça toplam kükürt uzaklaştırma verimi azalmaktadır. Eğer ağır ortam ile 1,68 yoğunlukta yıkama yapılırsa, %30 kül ve %80,49 yanabilir verimle elde edilen lavede %2,78 S ve %43,98 kükürt uzaklaştırma verimiyle elde edilebilmektedir. Petrografik analizde ve Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi %3 framboidal ve %2 idiomorf piritin bulunması, Kangal linyitinde önemli miktarda pirit bulunduğunu göstermektedir. Reichert spirali ile farklı boyut gruplarında sırasıyla lavelerde %1,01, %1,32 ve %1,52 toplam kükürt değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla Reichert spirali ile piritik kükürt uzaklaştırmanın etkili olması bu düşüncüyü desteklemektedir.

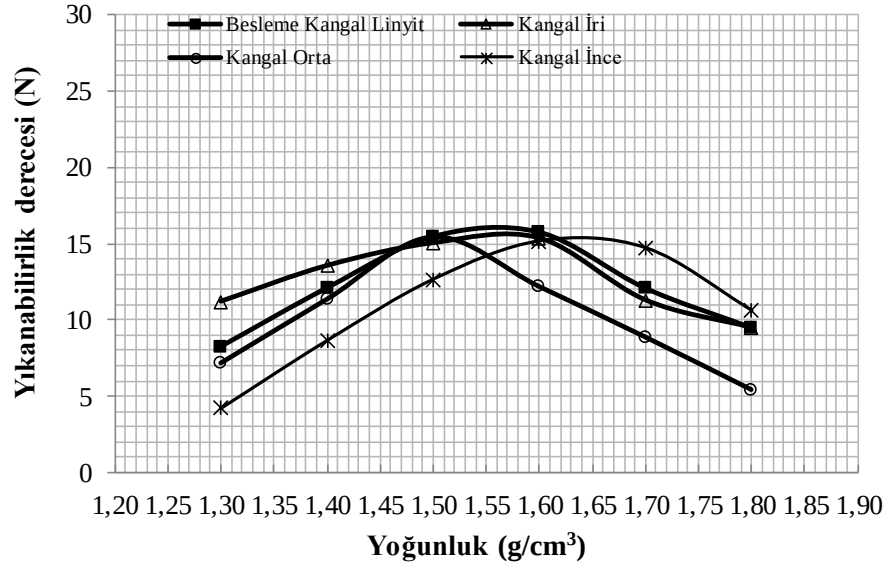


Şekil 4.27. Kangal linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe kükürt uzaklaştırma değişimi

- **Kangal linyitinin yıkanabilirlik indekslerinin değerlendirilmesi**

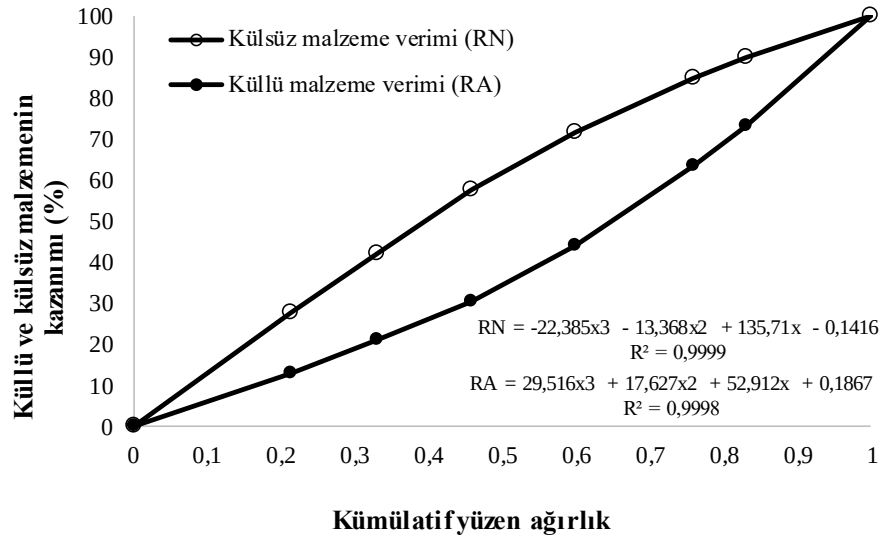
Hesaplanan yıkanabilirlik derecesi (N) değerlerine karşı her bir yüzen yoğunluğun fonksiyon grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir. Tüm tane boyut fraksiyonları için farklı yoğunluklarda bir (maksimum) pik değeri elde edilmiştir. Optimum N değeri, bu pik değerlerinin eşdeğeridir. Optimum ayırma yoğunluklarının (optimum kesme noktaları) ince boyut için yaklaşık 1,60 g/cm³, orta boyut için 1,50 g/cm³, iri boyut ve besleme içinse 1,57 g/cm³ olduğu belirlenmiştir.

Optimum ayırma yoğunluğunda yıkanabilirlik sayısı (W) değerleri besleme, iri, orta ve ince boyut için sırasıyla 5,6-5-5,5 ve 4,8 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan N ve W değerleri literatürde verilen kolay yıkanan kömürlerin değerleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu anlaşılmıştır (Nasir vd., 2012; Abakay Temel vd., 2015). Sonuç olarak Kangal linyitinin oldukça zor yıkanabilir özellikte olduğu ortaya çıkarılmıştır. Benzer şekilde Kangal linyitinin yıkanabilirlik sayısı 9’un çok altında olduğu için, linyitin uygulamada ufalanabileceği üst tane boyutu 10 mm veya 10 mm’nin altındadır. Yıkama yöntemi olarak +0,5 mm kömür için ağır ortam siklonu veya eşdeğer (spiral) cihazı kullanılmalıdır (Ünlü, 1990).



Şekil 4.28. Kangal linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi

Yıkamanın kolay veya zor olduğunu belirlemek amacıyla, yıkanabilirlik sayısının dışında ayrıca yıkanabilirlik indeksi (IW) ve yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI) değerleri de hesaplanmıştır. Kangal linyiti için kümülatif yüzen kısmın ağırlığına karşılık küllü (R_A) ve (R_N) ve külsüz malzeme verimleri Şekil 4.29’da verilmiştir.

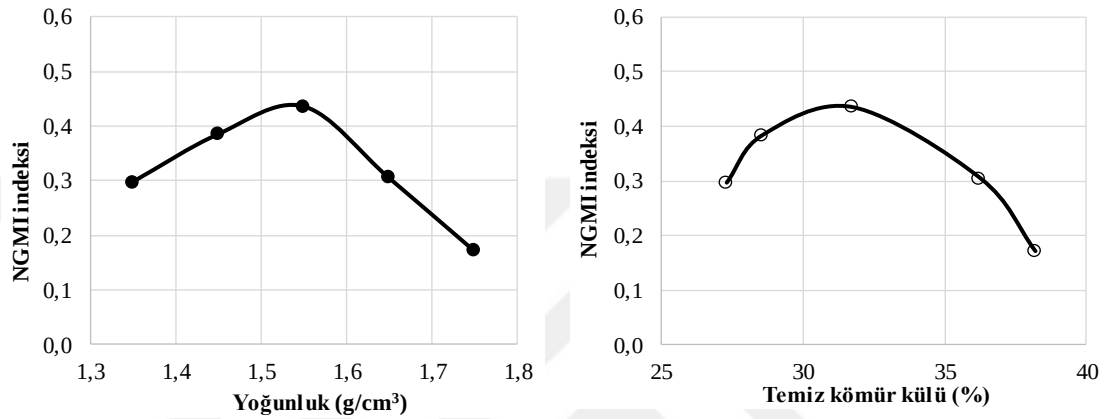


Şekil 4.29. Kangal linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri

Şekil 4.30’daki R_A ve R_N denklemleri kullanılarak IW değeri 13,09 ve NGMI değerleri ise 1,35-1,45-1,55-1,65 ve 1,75 g/cm³ yoğunluklar için sırasıyla 0,30-0,38-0,44-0,30 ve 0,17 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.9). Bu değerler literatürde kolay yıkanabilen olarak tanımlanan kömürlerle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Örneğin; Chandra Sekhar vd. (2007), Hindistan

Kuju kömürlerinin farklı boyutlara öğütülmüş örnekleriyle yaptıkları çalışmalarda IW değerlerini 30,9 ile 41,4 arasında, NGMI değerlerini ise 0,03 ile 0,33 arasında hesaplamışlardır.

Yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri Şekil 4.31’de verilmiştir. Şekil 4.30’dan görüldüğü gibi yıkanabilirliğin 1,55 g/cm³ yoğunluğa kadar zor olduğu daha yüksek yoğunluklarda ise gittikçe kolaylaştığı; temiz kömür külünün ise buna bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar yıkanabilirlik eğrileri ve diğer indeksler ile uyum içerisindedir. Hesaplanan tüm yıkanabilirlik indeksleri Çizelge 4.9’da toplu olarak verilmiştir.



Şekil 4.30. Kanga linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri

Çizelge 4.9. Kanga linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri

Ortalama yoğunluk (g/cm ³)	1	1,45	1,55	1,65	1,75	1,85
Konsantrasyon kriteri (k)	1,65					
±0,1 yoğ. yüzen malzeme miktarı		24,48	28,78	29,98	23,18	
Yakın malzeme yoğunluk indeksi (NGMI)		0,30	0,38	0,44	0,30	0,17
Yıkanabilirlik indeksi (IW/GIW)					13,09	
Yıkanabilirlik sayısı (W)				5,59		

4.2.2. Sallantılı masa deneyleri

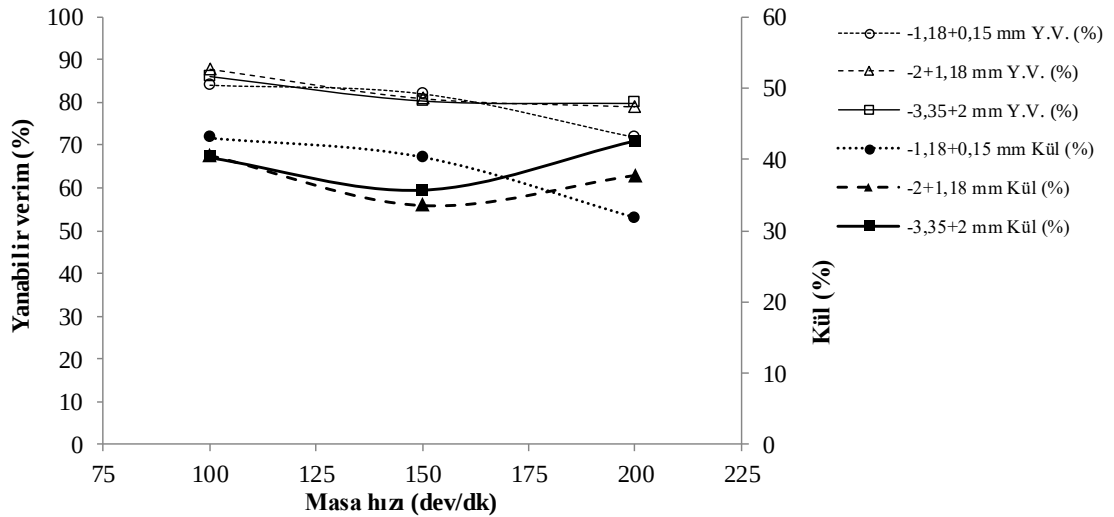
Sallantılı masa deneyleri için tüvenan linyit örneği çekiçli (darbeli) kırıcıdan geçirilerek, çalışma boyutları olan -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm boyut gruplarına ayrılmıştır. İri, orta ve ince boyut gruplarına ayrılan linyit örneklerine %25 katı oranında, 100, 150, 200 dev/dk masa hızlarında ve 2°, 4°, 6° masa eğimlerinde sallantılı masa deneyleri uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalarda hedef kül ve kükürt içeriğinin düşürülmesi olduğundan, yapılan yorumların tamamı lave açısından değerlendirilmiştir. Deneylerde beslenen tane boylarına ait miktar ve kül değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

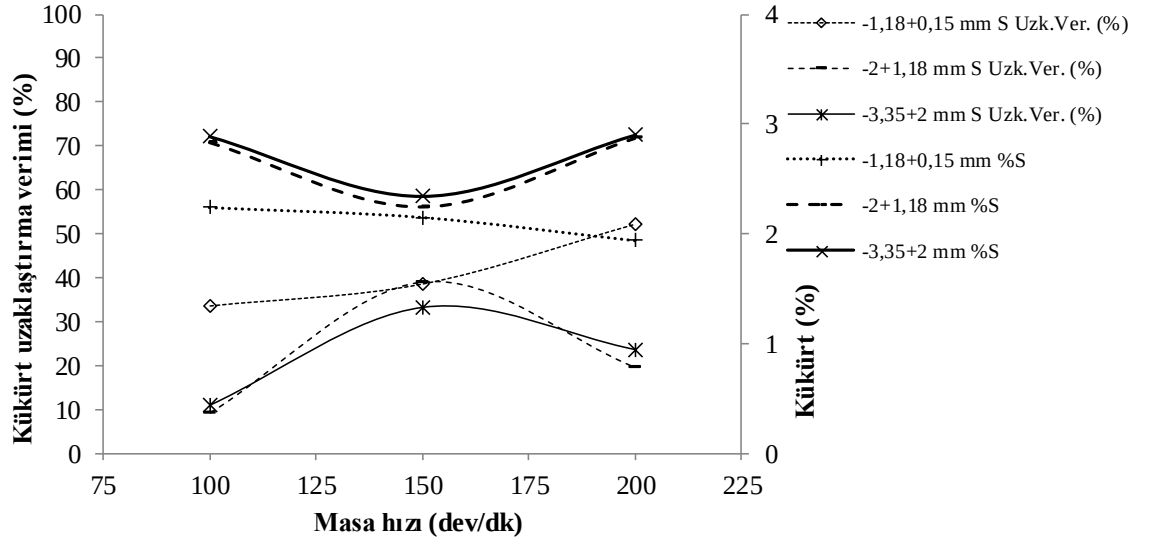
Çizelge 4.10. Kangal linyitinin sallantılı masa ve spirale beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri

Tane boyutu (mm)	Miktar (%)	Kül (%)
-3,35+2	29,42	41,50
-2+1,18	27,27	40,63
-1,18+0,15	33,56	39,49
-0,15	9,75	73,02
Besleme	100,00	43,66

Kangal linyitinin her bir boyut grubuna ait en uygun sarsıntı hızı ve eğim sonuçları, kül ve yanabilir verim açısından değerlendirilmiştir. Tane boyutlarına göre, sarsıntı hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkileri Şekil 4.31'de gösterilmiş ve tüm sallantılı masa deney sonuçları Ek 5'de verilmiştir. Şekil 4.31 kül içeriklerine göre değerlendirildiğinde, literatüre uygun olarak ince boyutlarda yüksek sarsıntı hızında, iri boyutlarda ise düşük masa hızlarında çalışılmasının uygun olduğu, lave külü ile yanabilir verim arasında ters bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir (Önal, 1980; Wills, 1988; Laskowski, 2001).



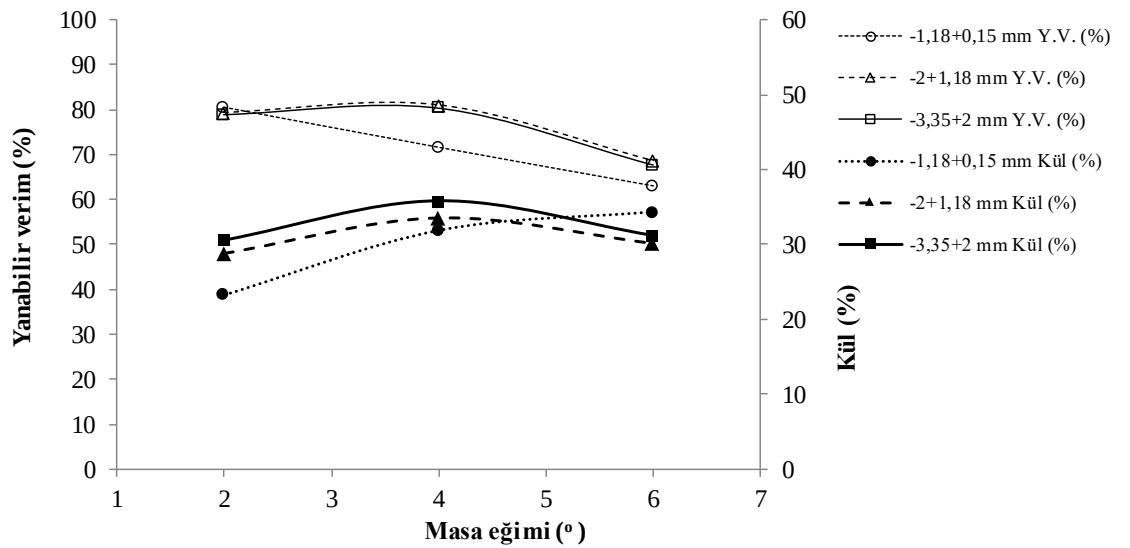
Şekil 4.31. Kangal linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi



Şekil 4.32. Kangal linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

Sallantılı masa hızının toplam kükürdün uzaklaştırılması açısından değişimi Şekil 4.32’de gösterilmiştir. Şekil 4.32’den görüldüğü gibi sallantılı masa hızı toplam kükürt uzaklaştırması açısından yeterli olmamıştır. Sadece ince boyutta (-1,18+0,15 mm) serbestleşmeye bağlı olarak %52,1 kükürt uzaklaştırma verimiyle kükürt içeriği %2,94’den %1,94’e kadar azalmıştır. Daha iri boyutlarda ise belirgin bir azalma belirlenmemiştir. Kükürt uzaklaştırma bilindiği gibi piritik kükürt açısından mümkün olduğundan, masa hızının piritin uzaklaştırılmasında yeterince etkili olmadığı sonucuna varılabilir.

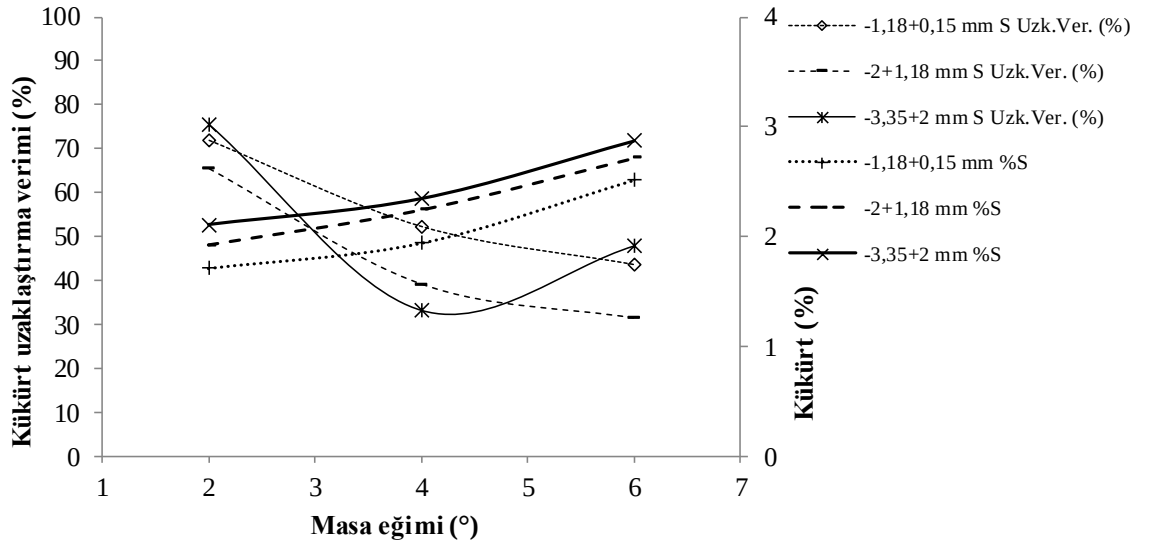
Optimum masa hızlarında gerçekleştirilen masa eğimi deneylerinde, kül ve yanabilir verim değişimini gösteren ilişki Şekil 4.33’de verilmiştir.



Şekil 4.33. Kangal linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi

Şekil 4.33'den görüldüğü gibi, tüm boyutlarda lave külü açısından düşük eğimde (2°) çalışılması gerektiği anlaşılmaktadır. Masa eğimi sonuçları, kül açısından değerlendirildiğinde masa hızı sonuçlarından çok daha iyidir. Bu sonuçlar ayırırda masa eğiminin daha etkili bir parametre olduğunu göstermektedir. Sallantılı masa deneyleri sonucunda üç boyuttan alınan en iyi lavelerin birleştirilmesiyle, %43,66 küllü beslenen linyitten, %89,62 yanabilir verimle %27,72 küllü lave elde edilebilmiştir.

Sallantılı masa eğiminin toplam kükürdün uzaklaştırılması açısından değişimi Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Şekil 4.34'den görüldüğü gibi düşük masa eğiminde (2°), tüm boyutlarda hem kükürt içeriği azalmış hem de kükürt uzaklaştırma verimi belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Bu sonuçlar, masa eğiminin toplam kükürt ve dolayısıyla piritik kükürt uzaklaştırma verimi üzerine çok etkili olduğunu göstermektedir. İri, orta ve ince boyutlarda laveler sırasıyla %2,11 S, %1,92 S ve %1,71 S içeriğiyle ve %75,48, %65,4, %71,75 kükürt uzaklaştırma verimleriyle kazanılmıştır. Lavelerin birleştirilmesiyle %1,92 S içerikli lave %70,92 kükürt uzaklaştırma verimiyle elde edilebilmiştir.



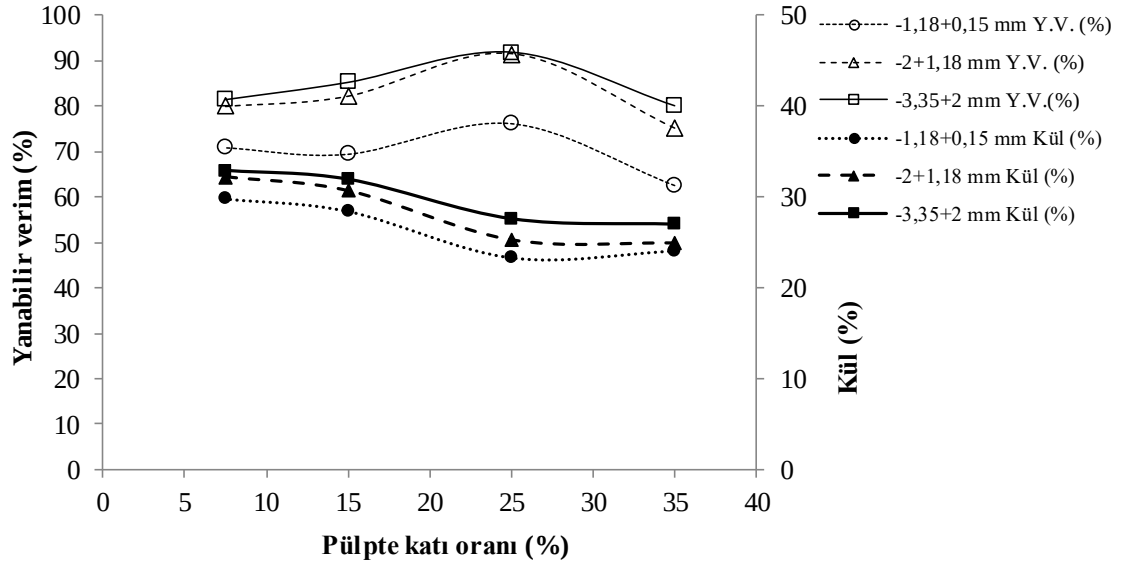
Şekil 4.34. Kangal linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

4.2.3. Reichert spirali deneyleri

Reichert spirali kullanılarak -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyut grupları ile pülpte katı oranı ve ayırma bıçak konumu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tabaka halinde akan akışkan ortamda yapılan gravite ayırmalarında önemli bir parametre olan katı oranını belirlemek amacıyla, tüm tane boylarında lave bıçak açılığı 150° sabit tutularak, %7,5, %15, %25 ve %35'lik pülpte katı oranları denenmiştir. Reichert spiral deneylerine ait sonuçlar Ek 6'da verilmiştir.

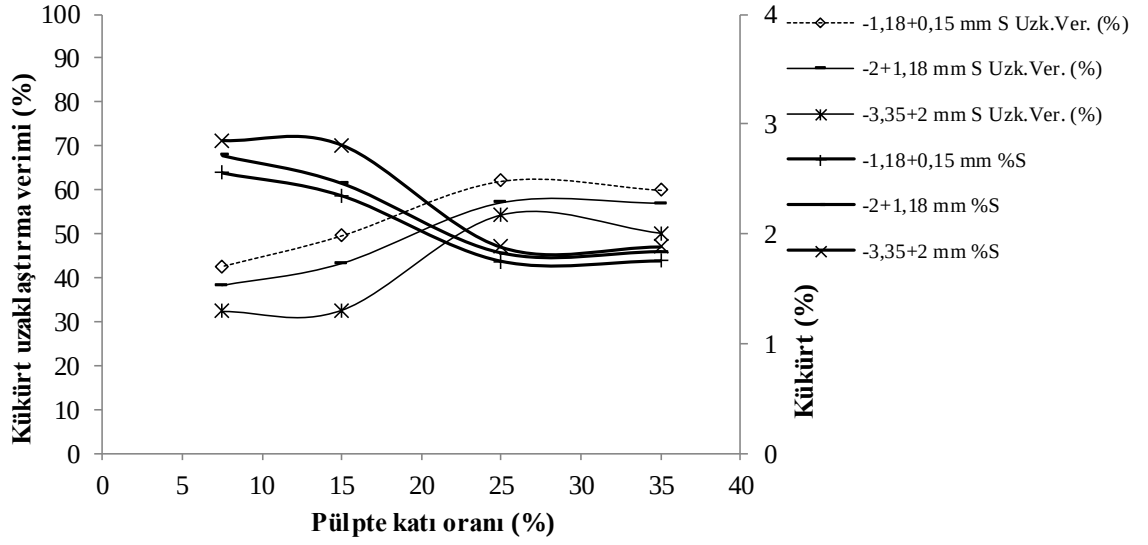
-3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyutundaki örnekler için, pülp te katı oranı değiştirilerek elde edilen Reichert spiral sonuçları Şekil 4.35’de gösterilmiştir. Reichert spirali ile gerçekleştirilen tüm boyut gruplarında, katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimlerinin benzer eğilim gösterdiği Şekil 4.35’de görülmektedir. Tüm tane boyutlarında %25 katı oranında en düşük lave külleri ve en yüksek yanabilir verimleri elde edilmiştir. Ekonomiklik açısından %35 katı oranında çalışmak mümkün iken, yanabilir verimlerinde %8-16 arasında azalmalar belirlenmiştir. Bu nedenle %25 katı oranının optimum katı oranı olarak seçilmesine karar verilmiştir. Seçilen katı oranı literatür ile uyumludur (Altun ve Hiçyılmaz, 2002; Öney vd., 2014).

Reichert spirali ile yapılan katı oranı belirleme deneylerindeki tüm boyutların lave küllerinin birleştirilmesiyle %25,48 küllü lave %89,95 yanabilir verimle kazanılmıştır.



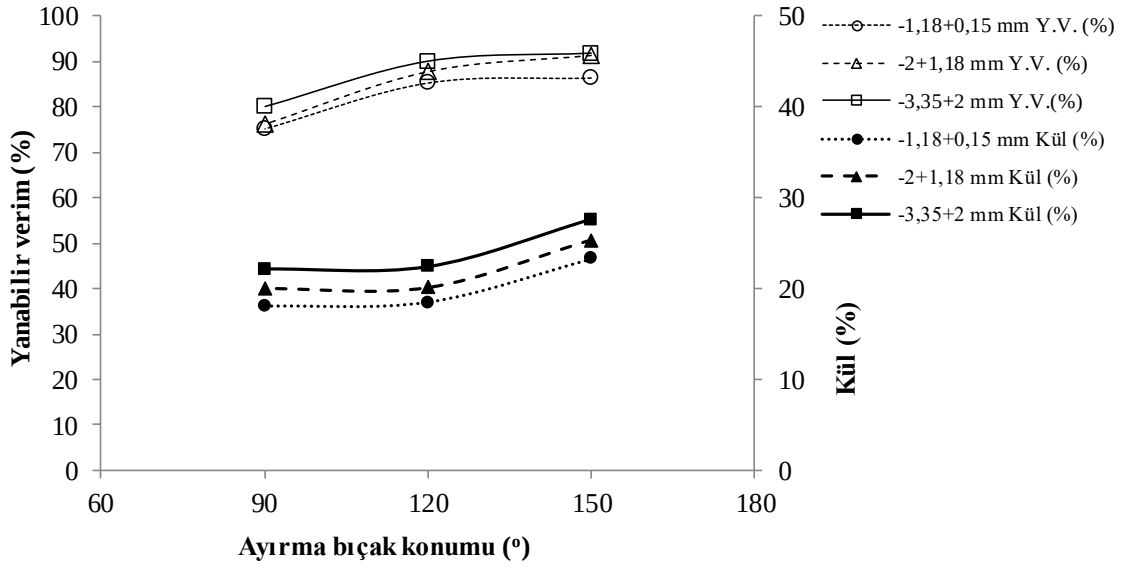
Şekil 4.35. Kangal linyitinin Reichert spiralinde, tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülp te katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.36’dan görüldüğü gibi tane boyutunun azaltılmasına ve piritik kükürt serbestleşmesine bağlı olarak hem lave kükürdünde azalma, hem de toplam kükürt uzaklaştırma veriminde artış belirlenmiştir. Kül ve kükürt azalmasının temel nedeninin, gravite ayırımında etkin olan engelli çöküş şartlarının sağlanabilmesi ve spiralde merkezkaç kuvvetinin etkili olmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Tane boyutlarına ait lavelerin birleştirilmesiyle, %2,94 S içeren besleme linyitinden %57,6 kükürt uzaklaştırma verimiyle %1,82 S içeren lave kazanılmıştır. Buna göre Kangal linyiti için kükürt uzaklaştırma sonuçları göreceli olarak başarılıdır sonucuna varılabilir.



Şekil 4.36. Kangal linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

Pülpte katı oranı belirlendikten sonra, lave bıçak ayarları 90° ve 120° olacak şekilde değiştirilerek deneylere devam edilmiştir. Bıçak ayarlarının değişimine göre elde edilen deney sonuçları Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



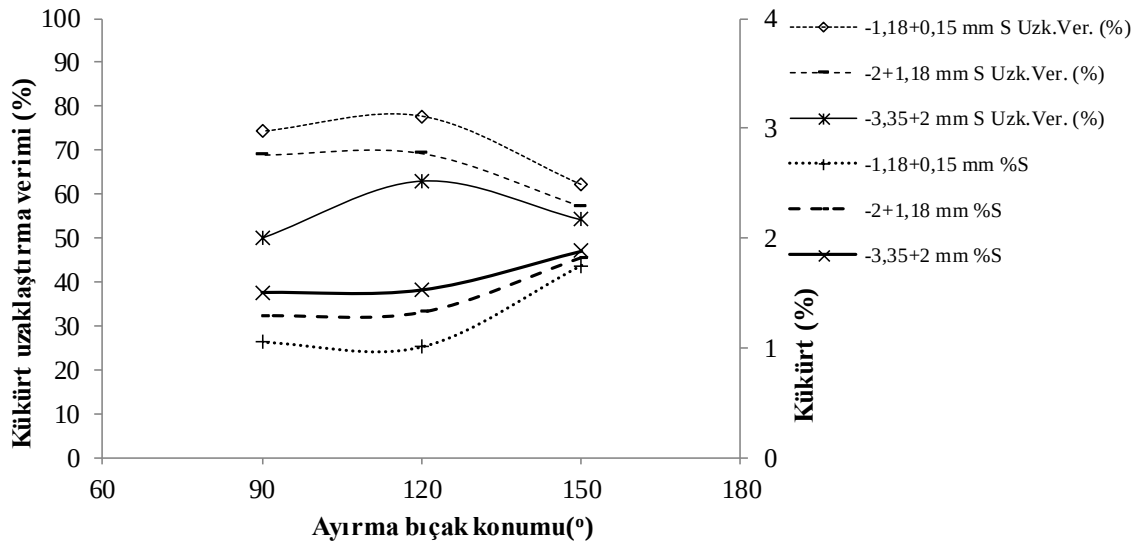
Şekil 4.37. Kangal linyitinin Reichert spiralinde, tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.37’den görüldüğü gibi tüm tane boyutlarında en düşük lave kül değerleri 90°’lik bıçak konumunda olmasına rağmen, düşük yanabilir verimlerinden dolayı 120° bıçak açıklığının seçilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir. Bıçak ayarları konumunun ayırmada önemli bir

parametre olduğu tespit edilmiştir. Lave külleri tüm boyutlarda %18 ile %27,59 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar gerçekleştirilen bütün gravite ayırmalarında elde edilen en düşük lave kül değerleridir. Reichert spiralinin ekonomikliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilmesinin yanında, düşük kül değerleri elde edilmesi önemli bir avantajıdır. Deneyler sonucunda %43,66 kül içeren besleme linyitinden, %87,75 yanabilir verimle %20,41 küllü lave elde edilmiştir.

Şekil 4.38'den kül uzaklaştırmada olduğu gibi kükürt uzaklaştırmada da ayırıcı bıçak konumunun etkili olduğu görülmüştür. Ayırıcı bıçağın 90° ve 120° konumlarında tüm boyutlarda kükürt içeriği birbirine yakınken, kükürt uzaklaştırma verimlerinin 120°'de daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı 120° bıçak açıklığı tercih edilmiştir.

Tüm tane boyutlarında lavelerin birleştirilmesiyle, %2,94 S içeren besleme linyitinden %69,8 kükürt uzaklaştırma verimiyle %1,29 S içeren lave kazanılmıştır. Reichert ile bıçak ayarı deneylerinde kükürt içeriği %1,82'den %1,29'a düşmüştür. Buna karşılık kükürt uzaklaştırma verimi ise %57,6'dan %69,8'e yükselmiştir. Bu sonuçlar ayırıcı bıçak konumunun kül ve kükürt açısından çok önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.38. Kangal linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumunun kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

Kangal linyitinde zenginleştirme deney sonuçları, bünye içerisinde yüksek miktarda piritik kükürdün bulunduğunu göstermektedir. Gravite ayırımlarında serbestleşmeye bağlı olarak piritik kükürdün uzaklaştırılabildiği varsayımından yola çıkarak, hem sallantılı masa hem de Reichert spirali ile piritik kükürdün uzaklaştırılabildiği belirlenmiştir. %2,94 S içeren beslemenin lavede %1,29 S'e kadar yaklaşık %70'nin giderilebildiği belirlenmiştir. Sonuçlar Kangal linyitinde

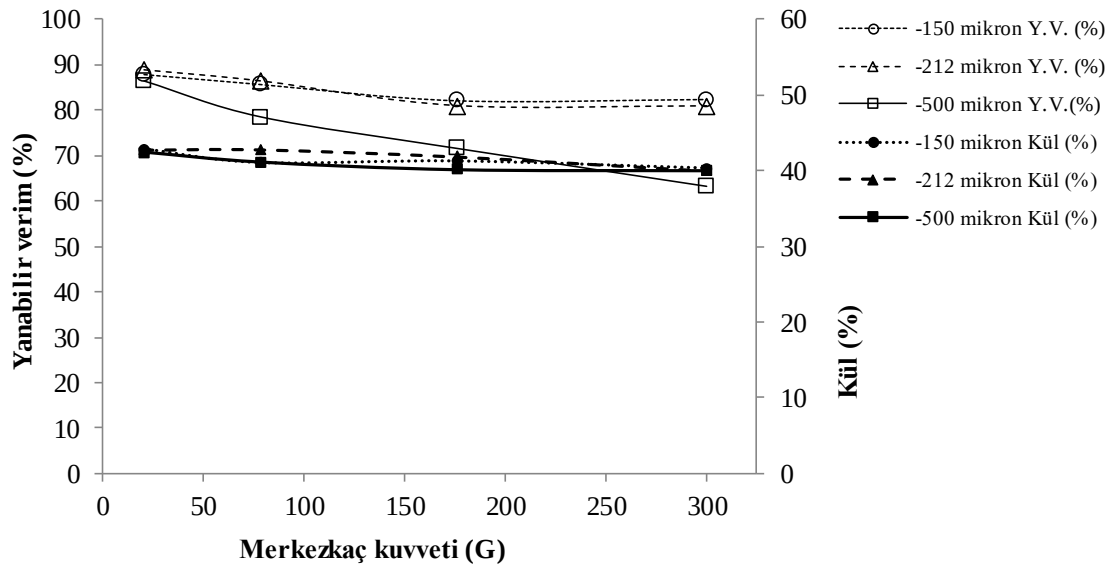
bünye kükürdünün göreceli olarak az olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar fiziksel, kimyasal ve petrografik analiz sonuçları ile uyum içerisindedir.

4.2.4. Falcon konsantratör deneyleri

Falcon konsantratör deneylerinde -500 μm , -212 μm ve -150 μm olmak üzere 3 farklı tane boyutu ve 20, 78, 176 ve 300 G olmak üzere 4 farklı merkezkaç kuvveti (G) kullanılmıştır.

500 μm , 212 μm ve 150 μm altına indirilen, Kangal linyitinin merkezkaç kuvvetlerine bağlı olarak gerçekleştirilen Falcon konsantratör deney sonuçları Şekil 4.39’da verilmiştir.

Şekil 4.39’dan görüldüğü gibi, tüm boyutlarda Falcon konsantratör ile gerçekleştirilen ayırım çalışmalarında arzulanan kül azaltma değerlerine ulaşılamamıştır. Bunun temel nedeninin, çok ince boyuttaki killerin üst akıma kapılarak laveye kaçması olduğu düşünülmektedir. Falcon konsantratörden elde edilen lavelerin toplam kükürt içeriklerinin %2,87-%2,90 arasında değişmesinden dolayı, kükürt uzaklaştırmanın da başarısız olduğu belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir (Oruç vd., 2010, Boylu 2013). Kangal linyitinin yumuşak linyit olması nedeniyle, Falcon konsantratör ile hem kül hem de kükürt uzaklaştırma verimlerinde başarılı sonuçlar elde edilememiştir. Falcon deneylerine ait sonuçlar Ek 7’de verilmiştir.

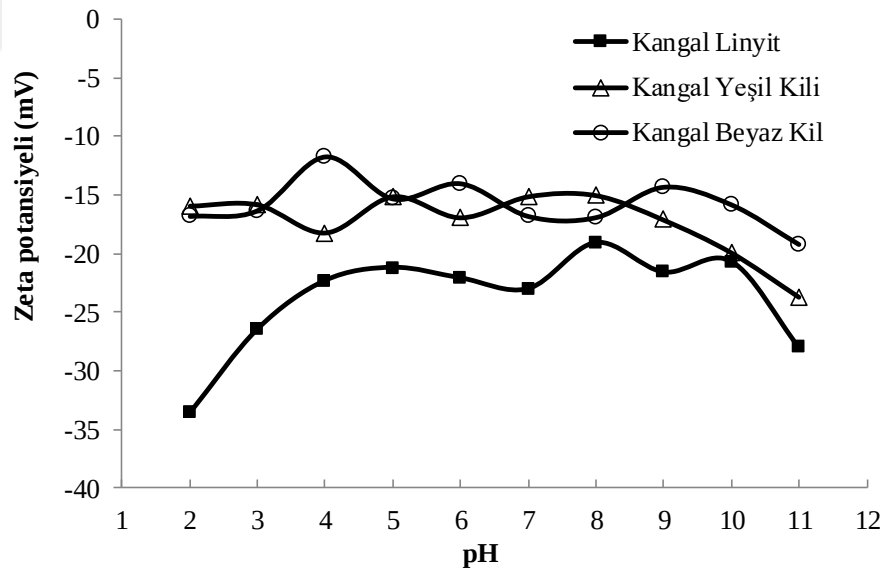


Şekil 4.39. Kangal linyitinin Falcon konsantratörde tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

4.2.5. Flotasyon deneyleri

Flotasyon öncesinde Kangal linyiti ve beraber bulunan killerin yüzey yükü davranışlarını belirlemek amacıyla zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. pH'a bağlı olarak ölçülen zeta potansiyeli sonuçları Şekil 4.40'da verilmiştir. Şekil 4.40'da görülen durum beklenenin aksine Kangal linyitinin kil minerallerinden daha fazla negatif yüzey yüküne sahip olmasıdır. Bu durumun flotasyonu olumsuz yönde etkileyeceği sonucuna ulaşılabilir. Flotasyonda her ne kadar nört yağlar kullanılsa da, linyitin daha negatif olmasının köpüklü yüzdürmeye olumsuz etkisi olacağı beklenmelidir.

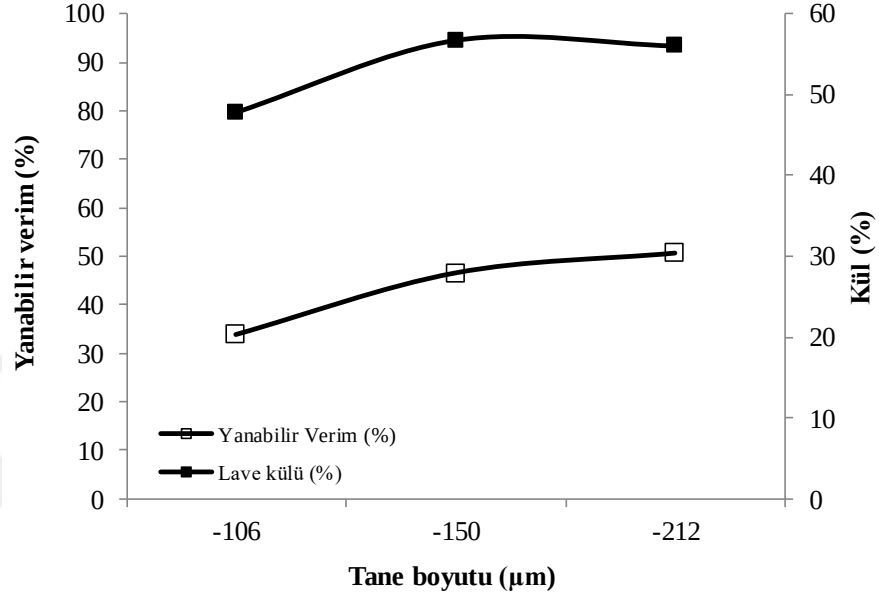
Oksitlenmeden kaynaklanabilecek hidrofilikliği azaltmak amacıyla, öğütme deneyden hemen önce yapılmış ve yeni yüzeylerin oluşması sağlanmıştır. Flotasyon deneyleri tamamı 212 µm, 150 µm ve 106 µm boyutlarının altına öğütülmüş olan 3 farklı boyutta; gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot olmak üzere 3 farklı toplayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Flotasyonda pülpte katı oranı %20, pervane hızı 1400 dev/dk, pH :7, 1000 g/ton Na₂SiO₃ bastırıcı, 150 g/ton MIBC köpürtücü miktarı sabit tutulmuştur. Flotasyon deneylerinde 2000 g/ton gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot toplayıcı olarak denenmiştir. Pülp 3 dakika karıştırıldıktan sonra, 3 dakika bastırıcı ve 3 dakika toplayıcı ile koşullandırılmış ve 6 dakika süreyle köpük alınmıştır.



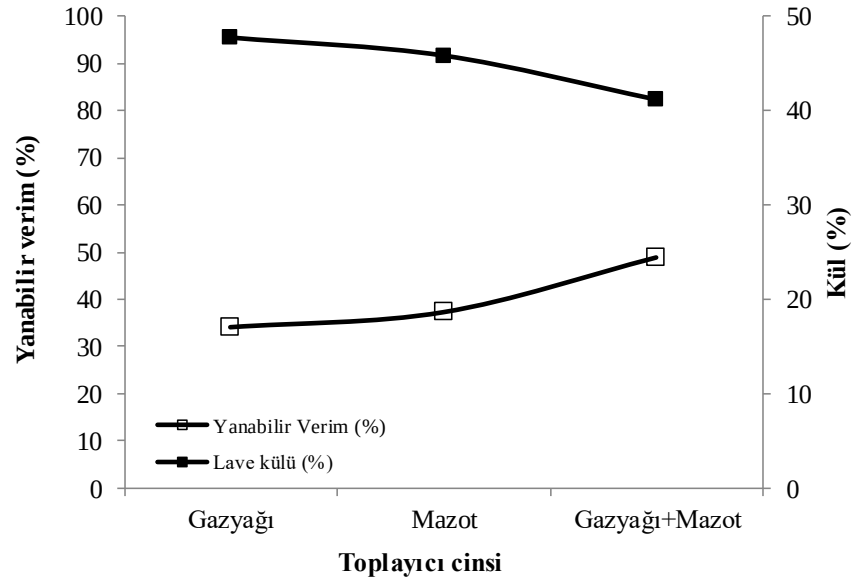
Şekil 4.40. Kangal linyiti ve kilinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri

Kangal linyitinin tane boyutu ile yapılan flotasyon deney sonuçları Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Şekil 4.41'e göre zeta potansiyeli sonuçlarına uyumlu olarak ters flotasyon gerçekleşmiştir. Külün %43,66'dan %53-56'lara yükselmesi flotasyonda killerin yüzdürüldüğünü göstermiştir. Flotasyon deneylerine ait sonuçlar Ek 8'de verilmiştir.

Tane boyutuna göre gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde sağlanamayan seçimliliği sağlamak amacıyla toplayıcı çeşidinin taranmasına karar verilmiştir. Kangal linyitinin toplayıcı çeşidine göre gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları Şekil 4.42’de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Kangal linyitinin gazyağı ile flotasyonunda, tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi



Şekil 4.42. -106 µm boyutlu Kangal linyitinin, flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.42'den görüldüğü gibi, seçimliliği arttırmak amacıyla yapılan flotasyon deneylerinde göreceli olarak kısmi bir başarı elde edilmiştir. Ancak yine de istenen kül içeriklerine ulaşılamamıştır. Gazyağı+mazot karışımının kömür kil ayırımına (seçimliliğe) faydalı olduğu belirlenmiştir. 2000 g/t gazyağı+mazot karışımıyla %41,19 küllü lave %49 yanabilir verimle kazanılmıştır. Kül azaltmanın daha çok ayrıntılı çalışma gerektirdiği ve gravite zenginleştirme sonuçlarına ulaşmanın zor olacağı anlaşıldığından dolayı, flotasyon çalışmalarına devam edilmemiştir. Linyit kömürlerinin çok zor yüzebildiği veya yüzmediği literatürde de görülmektedir (Sivrikaya, 2014; Temel vd., 2010; Ceylan ve Küçük, 2004).

4.2.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması

Zenginleştirme işlemleri, tüvenan linyitin külünü azaltarak teknolojik ürün elde edilmesini kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Külü azaltılan linyitlerin kaliteli piroliz ve sıvı ürün elde edilmesine yönelik çalışmaların özeti olarak, gerçekleştirilen tüm zenginleştirme sonuçları Çizelge 4.11'de karşılaştırılmıştır. Zenginleştirme sonuçlarını toplu halde gösteren Çizelge 4.11'e göre, kül ve toplam kükürt giderimi açısından gravite zenginleştirme yöntemlerinin tamamı flotasyona göre daha olumlu sonuçlar vermiştir. Gravite yöntemlerinin kendi içerisinde karşılaştırılması yapıldığında ise Reichert spiralinin en iyi kül ve kükürt giderimine sahip olan yöntem olduğu tespit edilmiştir. Yanabilir verim açısından ise yöntemler arasından belirgin bir farklılık (%84,99-%89,62) olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla zenginleştirmede amaç kül ve kükürdü azaltarak teknolojik ürüne malzeme hazırlamak olduğundan, nihai hedefe yönelik olarak Reichert spiralinin seçilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 4.11. Kangal linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması (havada kuru baza göre)

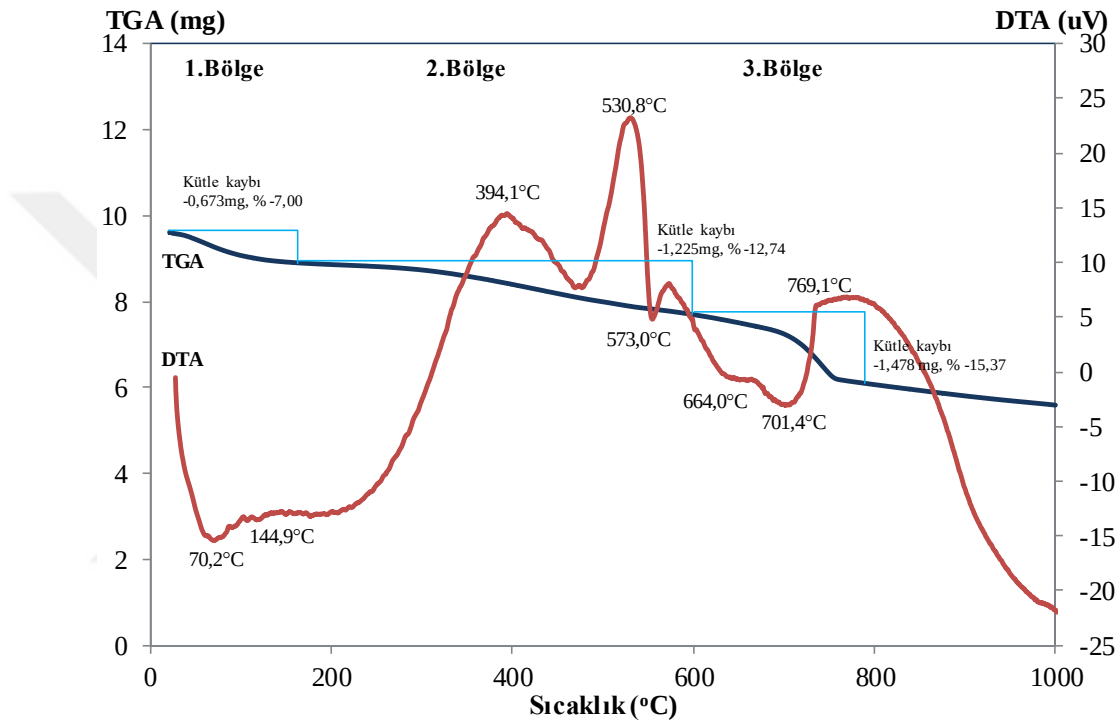
Zenginleştirme yöntemleri	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Toplam kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	AID (kcal/kg)
*Yüzdürme-batırma testleri (1,7 g/cm ³ de yüzen)	36,24	84,99	2,69	35,20	3220
*Sallantılı masa	27,72	79,62	1,92	70,92	3635
*Reichert spirali	20,41	77,75	1,29	69,79	3990
*Falcon konsantratör	40,11	76,38	2,87	14,53	3035
Flotasyon	41,19	49,00	2,99	-	2980
İşleme girmeyen (-0,15 mm)	73,02	4,67	3,81	-	Okunamadı
Kangal linyiti	43,66	100	2,94	-	2860

* Birleştirilmiş tane boyutlarına göre hesaplanmıştır.

4.2.7. Piroliz deneyleri

Zenginleştirme yönteminin piroliz ürünlerinin verimine etkisini belirlemek amacıyla önce tüvenan linyit örnekleri, daha sonra ise en iyi zenginleştirme ürününün piroliz deneyleri yapılmıştır. Piroliz deneylerinde optimum tane boyutu, piroliz sıcaklığı ve süresinin etkisi test edilmiştir. Piroliz deneylerine ait tüm sonuçlar Ek 9’da verilmiştir.

Piroliz deneyleri azot (N_2) gazı ortamında gerçekleştirildiğinden, Kangal linyitinin azot ortamında DTA-TGA değişimi Şekil 4.43’de verilmiştir.



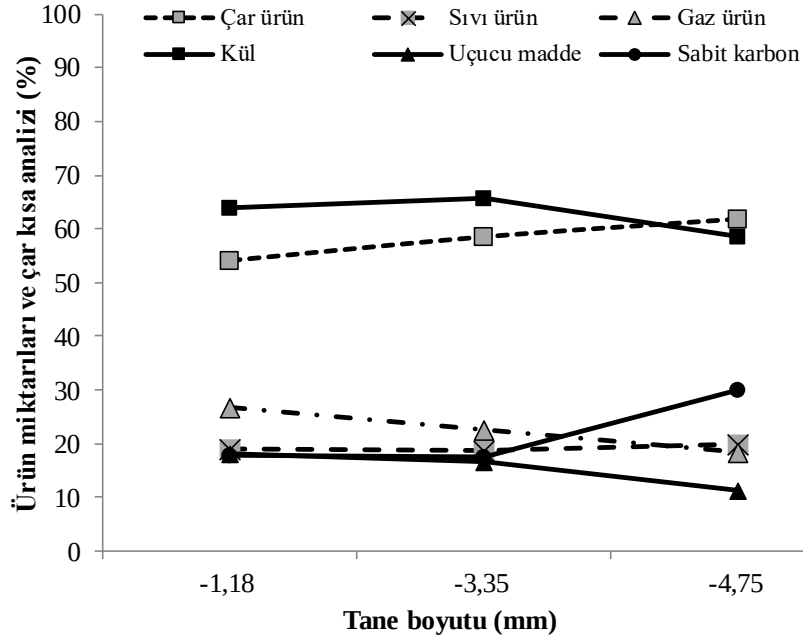
Şekil 4.43. Kangal linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

Şekil 4.43’deki DTA eğrisinde 3 bölge görülmektedir. Termogram eğrisinde yaklaşık 70°C ve 145°C’lerde görülen kaba nem ve bünye nemine bağlı olan pikler 1.bölgeyi, 394°C’de başlayan ve 664°C civarında biten uçucu madde çıkışı 2.bölgeyi, karbonat parçalanma başlangıç sıcaklığı olan 701°C’deki pik 3.bölgeyi göstermektedir. Bu sonuçlar Kangal linyiti ile çalışan Ceylan vd. (1999)’nin DTA termogramı ile uyumludur. Hava ortamı ile karşılaştırıldığında elde edilen piklerin daha yüksek sıcaklıklarda görüldüğü belirlenmiştir. Azot gazının inert olması bu durumun görülmesinin doğal nedenidir.

Çalışılacak tane boyutunu belirleyebilmek amacıyla, kömür numunelerinin tamamı 4,75 mm, 3,35 mm ve 1,18 mm tane boyutlarının altına indirilerek, 200 ml/dk N_2 gazı akışında, 3°C/dk ısıtma hızıyla, 500°C’de 30 dakika süreyle piroliz deneyleri yapılmıştır. Kangal linyitinin

piroliz deneylerinin tane boyutuna göre ürün verimi değişimleri ve kısa analiz sonuçları Şekil 4.44’de verilmiştir.

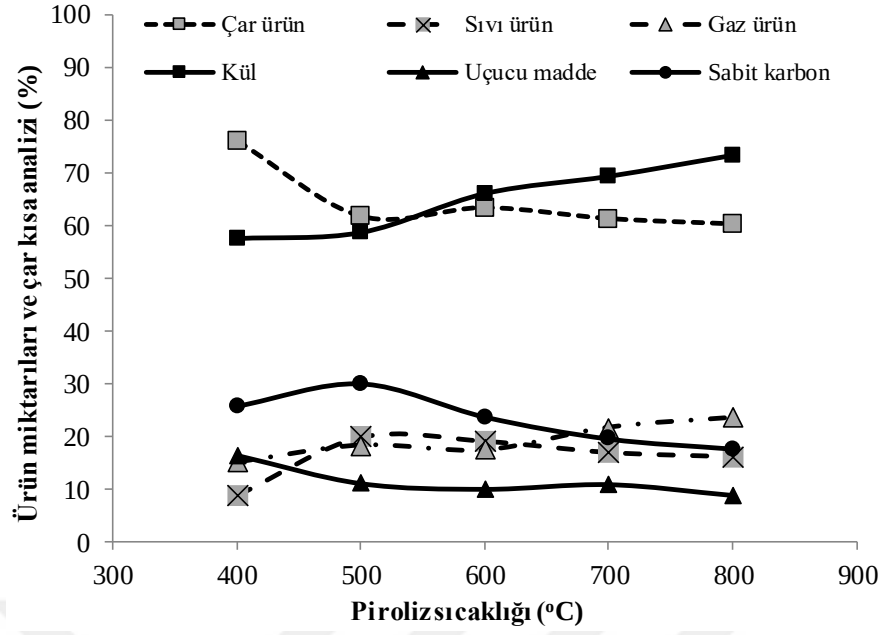
Şekil 4.44 incelendiğinde Kangal linyiti için en uygun tane boyutunun -4,75 mm olduğu görülmüştür. Bu boyutta %61,70 çar, %19,92 sıvı ve %18,38 gaz verimi elde edilmiştir. Beslemenin külü %43,66 iken çarın külü %58,70’e, sabit karbonu ise %18,60’dan %30,13’e yükselmiştir. Bundan sonraki aşamalarda piroliz tane boyutu olarak 4,75 mm altı kullanılmıştır.



Şekil 4.44. Kangal linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi

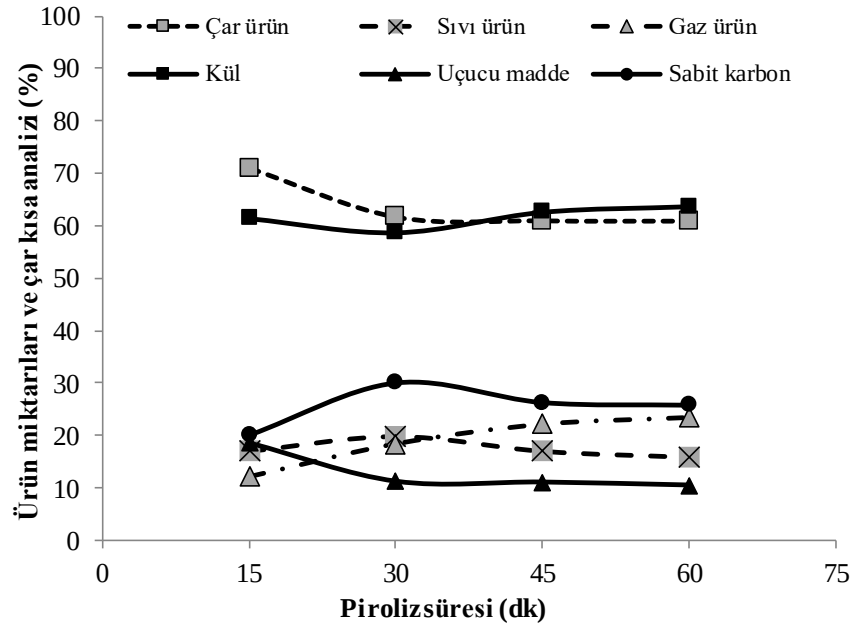
-4,75 mm tane boyutunda 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C’de piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz sıcaklığına ait deney sonuçları Şekil 4.45’de gösterilmiştir.

Şekil 4.45’de Kangal linyiti için piroliz sıcaklık artışına bağlı olarak, çar ürün verimi azalırken sıvı ve gaz ürün verimleri artış göstermiştir. Bu durum literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir (Wei vd., 2012; He vd., 2015; Lievens vd., 2013; Li vd., 2015). Çar veriminin ve buna bağlı olan sabit karbon içeriğinin yüksek ve nispeten çar külünün az olduğu 500°C’nin piroliz sıcaklığı olarak alınmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.45. Kangal linyitinin -4,75 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi

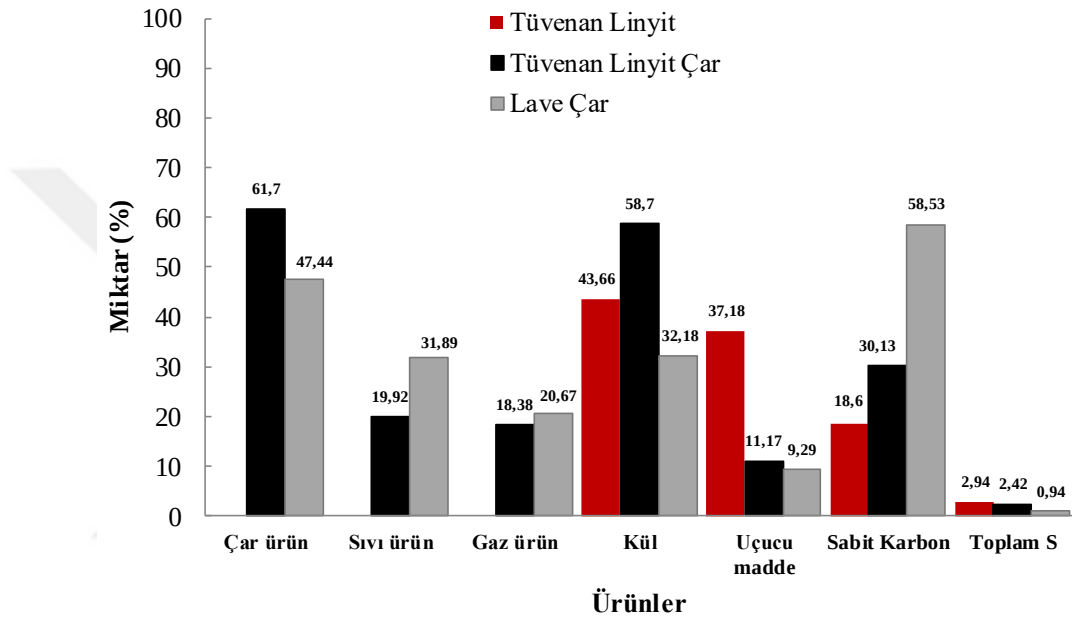
Fırın 500°C'ye ulaştıktan sonra 15, 30, 45 ve 60 dakika süreyle bekletilen numunelerin piroliz deney sonuçları Şekil 4.46'da gösterilmiştir. Şekil 4.46'dan, Kangal linyitinin 500°C'de piroliz süresi açısından 30 dakikanın seçilmesinin uygun olduğu düşünülmüştür.



Şekil 4.46. Kangal linyitinin -4,75 mm tane boyutunda ve 500°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi

Piroliz deneyleri sonucunda, Kangal linyiti için -4,75 mm tane boyutu, 500°C piroliz sıcaklığı ve 30 dakika piroliz süresinin optimum piroliz şartları olarak seçilmesine karar verilmiştir.

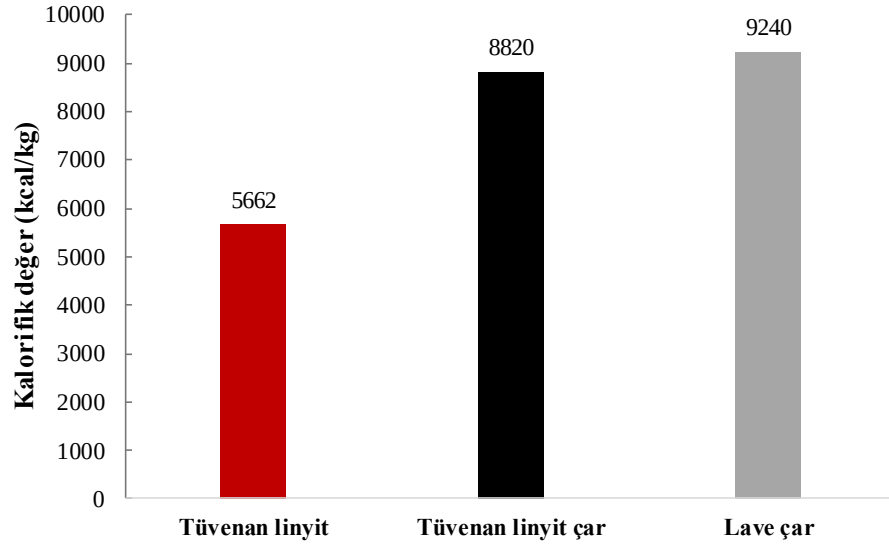
Doktora tez çalışmasının esasını oluşturan zenginleştirme yönteminin piroliz ve sıvılaştırma ürünlerine etkisini belirlemek amacıyla, Reichert spiralinden elde edilmiş lavenin, belirlenen optimum çalışma şartlarında piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz deneylerinin tüvenan linyite göre karşılaştırılması Şekil 4.47’de, kalorifik değerler ise Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.47. Tüvenan Kangal linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri

Şekil 4.47 incelendiğinde, Kangal linyitinin Reichert spirali zenginleştirilmesiyle yapılan piroliz deneylerinde, tüvenan Kangal linyitine göre çar üründe %14,26 azalma, sıvı üründe %11,97 ve gaz üründe ise %2,29 artış tespit edilmiştir. Çar ürünün kısa analizinde kül içeriği %58,70’ten %32,18’e azalırken, sabit karbonun içeriği %30,13’ten %58,53’e yükselmiştir.

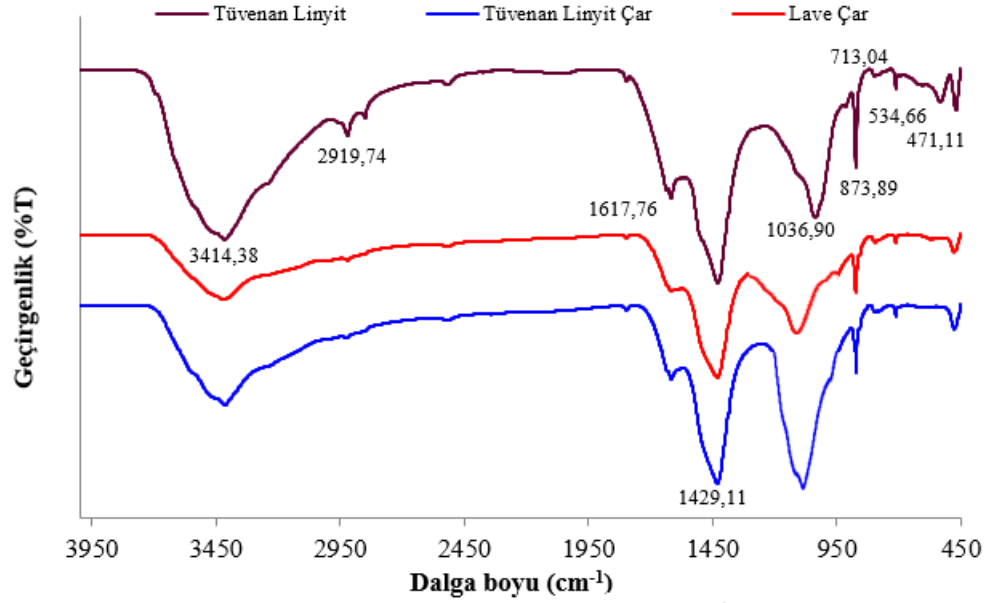
Şekil 4.48’den görüldüğü gibi tüvenan Kangal linyitinin pirolizi sonucunda elde edilen çar ürünün kalorifik değeri kuru-külsüz bazda 8820 kcal/kg iken, lave ürünün pirolizi sonucunda kalorifik değer 9240 kcal/kg’ye yükselmiştir. Bu durumda kalori değerinde yaklaşık 420 kcal/kg’lik bir artış hesaplanmıştır.



Şekil 4.48. Tüvenan Kangal linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri

Kangal linyitinin tüvenan ve lave halde piroliz edilmesiyle çar üründe sırasıyla %2,42 S ve %0,94 S elde edilmiştir. Tüvenan linyitin toplam kükürt içeriğinin %2,94 ve kalorisinin 5662 kcal/kg olduğu düşünülürse, tüvenan ve piroliz ürünlerin her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,52 %S/1000 kcal, 0,27 %S/1000 kcal ve 0,10 %S/1000 kcal olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ve kısa analiz sonuçları, piroliz ürünlerinden çar ürünün kullanılmasını teorik olarak mümkün hale getirmiştir. Yine lavenin pirolizi ile elde edilen yaklaşık %32 sıvı ürünün üzerine çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir. Piroliz deney sonuçlarından, zenginleştirmenin piroliz ürünlerinden çar ürün özellikleri üzerine belirgin bir şekilde olumlu yönde katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Kangal linyiti ile gerçekleştirilen çalışmalardan, zenginleştirme yönteminin ve piroliz ürünlerinden çar ürün ve sıvı ürün üzerine araştırmaların uygun olacağı kanaati oluşmuştur.

Piroliz deneylerinin sonuçlarının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla, Kangal linyitine ait tüvenan linyit, tüvenan piroliz ve lave pirolizinden elde edilen çar ürünlerin FTIR analiz sonuçları Şekil 4.49' da gösterilmiştir.



Şekil 4.49. Kangal linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerinin FTIR analiz sonuçları

Şekil 4.49 incelendiğinde, tüvenan ve zenginleştirilmiş çar ürünlerde, tüvenan linyitte kaydedilen 3414 cm⁻¹ pikinin şiddetinin azaldığı ve 2920 cm⁻¹ civarındaki alifatik yapıya ait karakteristik C-H pikinin ise kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum piroliz işlemi sırasında birçok C-C bağın bozularak parçalandığına işaret etmektedir. Piklerin şiddetindeki azalmanın uçucu madde çıkışına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Ayrıca 1430 cm⁻¹ civarında görülen pikin şiddetinde bir azalma görülmüştür. Bu da çar ürünlerin, tüvenan linyitten daha aromatik yapıda olduğunu göstermektedir. Si-O-Al/Fe/Ca/Mg vb. gerilmelerinin artmasıyla birlikte, 1037 cm⁻¹ pikinin şiddetinde bir azalma görülmektedir. Bu pik, yapı içerisindeki silisli ve inorganik maddeleri gösterdiği için, zenginleştirme işleminin başarılı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliğini tespit etmek amacıyla, optimum şartlarda deneyler 2 kere daha tekrarlanmıştır. Tekrarlanan piroliz deney sonuçları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Tekrarlanabilirlik test sonuçları Çizelge 4.12’den görüldüğü gibi, optimum piroliz sonuçları ile çok iyi uyum içerisinde. Bu sonuçlara göre piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliklerinin yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 4.12. Kangal linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri

(%)	Çar ürün	Sıvı ürün	Gaz ürün	Kül	Uçucu madde	Sabit C
Tüvenan kömür	61,70	19,92	18,38	58,70	11,17	30,13
Tüvenan kömür 1. Tekrar	61,73	19,89	18,38	58,73	11,15	30,12
Tüvenan kömür 2. Tekrar	61,72	19,91	18,37	58,71	11,16	30,13
Lave kömür*	47,44	31,89	20,67	32,18	9,29	58,53
Lave kömür 1. Tekrar*	47,42	31,87	20,71	32,23	9,45	58,32
Lave kömür 2. Tekrar*	47,42	31,90	20,68	32,20	9,47	58,33

*Beslemeye göre

4.2.8. Sıvılaştırma deneyleri

Tüvenan Kangal linyiti ve Reichert spirali lavesinin sıvılaştırma deney sonuçlarından elde edilen ürünlerin kısa analizi Çizelge 4.13’ de verilmiştir. Tetrahidrofuran (THF, C₄H₈O) ile yıkanan katı kalıntı (çar), vakum koşullarında kurutulduktan sonra tartılarak katı kalıntı (çar) verimleri belirlenmiş ve kül içerikleri analiz edilmiştir. Çizelge 4.13’den tüvenan linyitte 18,60 olan sabit karbon miktarına oranla çar ürünlerin karbon miktarlarında önemli bir artış olduğu görülmüştür.

Sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan linyitin katı kalıntısında 6903 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin katı kalıntısında 7083 kcal/kg; tüvenan linyitin preasfalteninde 7817 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin preasfalteninde 7961 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4374 kcal/kg iken zenginleştirilmiş linyitin yağ üründe ise 4991 kcal/kg olarak hesaplanmıştır.

Sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları Çizelge 4.14’de verilmiştir. Asfalten örneklerinin cam sistemlerden uzaklaştırmasının verdiği zorluk ve madde miktarının az olmasından dolayı elementel analizleri ve kalorifik değerleri tespit edilememiştir.

Çizelge 4.13. Tüvenan Kangal linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri

	Tüvenan Kangal linyitinin katı kalıntısı	Zenginleştirilmiş Kangal linyitinin katı kalıntısı
Kısa analizler (%)		
Kül	20,72	13,35
Uçucu madde	29,10	21,68
Sabit karbon*	50,18	64,97
Elementel analiz (%) (kuru-külsüz bazda)		
C	51,10	64,72
H	4,65	4,48
N	1,70	1,18
S	2,54	1,82
O*	40,01	27,80
Kalorifik değer (kcal/kg) (kuru-külsüz bazda)		
Katı kalıntı (çar)	7903	8283
Preasfalten	7817	7961
Yağ	4374	4991

*Fark ile

Çizelge 4.14. Kangal linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları

	Tüvenan Kangal linyitinin preasfaltini	Zenginleştirilmiş Kangal linyitinin preasfaltini	Tüvenan Kangal linyitinin yağı	Zenginleştirilmiş Kangal linyitinin yağı
C	72,16	79,21	73,46	85,14
H	5,59	6,56	7,82	8,96
N	1,19	1,34	0,41	0,30
S	0,92	0,71	0,39	0,26
O*	20,14	12,18	17,92	5,34

* Fark ile

Çizelge 4.15’de tüvenan Kangal linyiti ve zenginleştirilmiş linyitin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen ürünlerin verimi ve toplam dönüşümleri verilmiştir. Çizelge 4.15’e göre zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerden preasfalten verimi değişmezken, asfalten ve yağ+gaz verimleri artmıştır. Bayraktar ve Özkaplan

(1985), Kangal linyiti ile, tez çalışmasından farklı olarak 7 MPa soğuk hidrojen basıncı altında yapmış oldukları sıvılaştırma çalışmasında toplam dönüşüm, preasfalten, asfalten ve yağ miktarlarını daha yüksek olarak elde etmişlerdir. Yine Gül vd. (2004), Kangal linyiti ile amonyum tetrahimolibdat katalizörü ile yapmış oldukları sıvılaştırma çalışmasında toplam dönüşüm, asfalten ve yağ miktarlarını daha yüksek, preasfalten verimini ise daha düşük olarak hesaplamışlardır.

Çizelge 4.15. Kangal tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri

(%)	Çar verimi	Preasfalten	Asfalten	Yağ+gaz	Toplam dönüşüm
Kangal tüvenan çarı	68,26	10,62	3,33	17,79	31,74
Kangal lave çarı	51,76	10,80	5,00	32,44	48,24

Kömür sıvılaştırılmasının temel amacı yeni bir sıvı yakıt ve kimyasal hammadde üretebilmektir. Hem petrole alternatif bir sıvı yakıt olarak değerlendirilebilmesi, hem de temel kimyasal hammadde üretimi için uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, sıvılaştırma ürünü olarak elde edilen yağların nicel ve nitel analizleri GC-MS analizi ile yapılmıştır. Tüvenan ve zenginleştirilmiş linyit örneklerine ait GC-MS sonuçları Çizelge 4.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.16 incelendiğinde literatürde belirtildiği gibi, kömür sıvılaştırılması sonucu elde edilen yağların yapısında doymuş n-alkanlar, izoprenoid, dallanmış alkanlar, n-alkil sikloheksan, terpan ve diğer aromatik yapılar gözlenmiştir (Speight, 1994; Methakhup vd., 2007; Karaca ve Koyunoğlu, 2010b).

Çizelge 4.16’dan görüldüğü gibi, zenginleştirildikten sonraki kömür sıvısında, tüvenan kömür sıvısında var olmayan herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır. Buna göre, zenginleştirme işleminin sıvı ürün bileşiminde herhangi bir etkisinin olmadığı, buna karşılık asfalten ve yağ+gaz verimlerinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.15). Ancak teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

Çizelge 4.16. Kangal tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürününün GC-MS analiz sonuçları

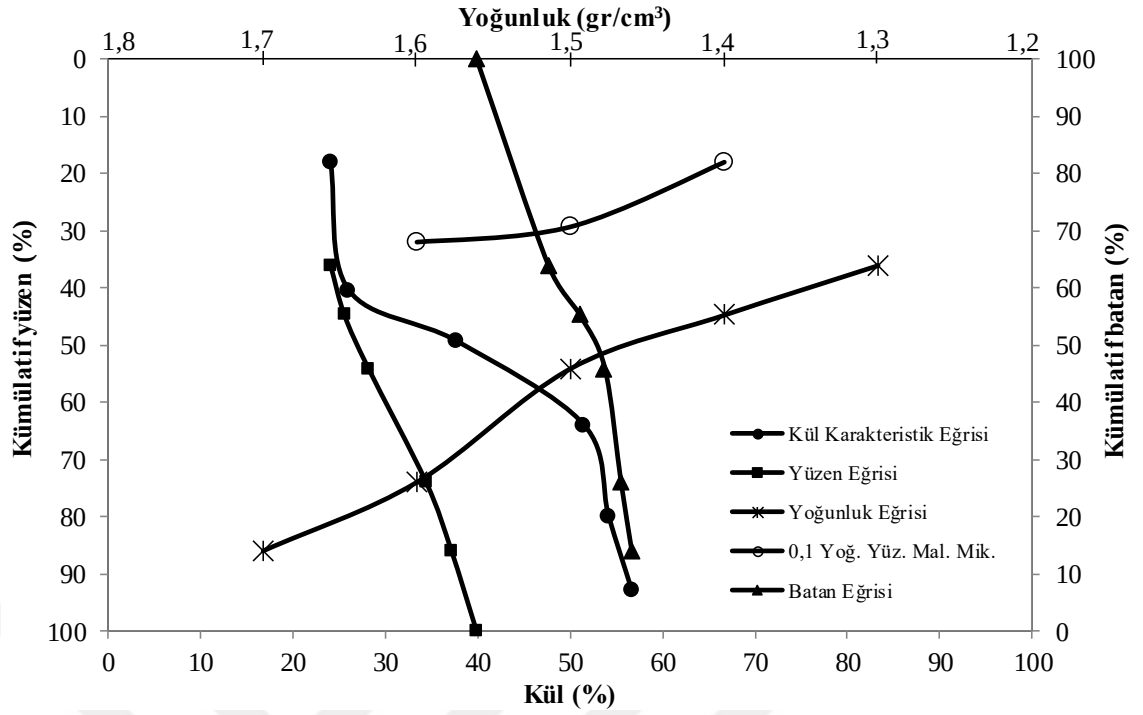
Tutulma süresi (dk)		Muhtemel bileşik adı		Toplamdaki miktar (Bolluk %)	
Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave
7,101	7,129	Toluen	Toluen	6,38	2,50
25,485	25,497	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	53,54	59,55
31,293	31,287	Azulen	Azulen	30,42	25,61
32,634	32,631	Naftalin	Naftalin		
		Naftalen,1,2,3,4-tetrahidro-1-propil	Naftalen,1,2,3,4-tetrahidro-1-propil	0,84	0,86
37,215	37,232	Naftalin, 2-metil-	Naftalin, 1-metil-	1,28	0,73
		Naftalin, 1-metil-	Naftalin, 2-metil-		
38,400	38,411	Butilhidroksi tolue	Butilhidroksi tolue	2,17	2,11
62,775	62,781	Benzen,1,3-Dietil-5-Metil	Benzen,1,3-Dietil-5-Metil	0,68	0,40
88,673	93,783	2,2'-binaftalen, 1,1',2,2',3,3',4,4'-oktahidro-	1,2,3,10,11,12-hekzahidro perlin 7,8,9,10,11,12-hekzahidro benzo [a]piren	1,37	1,03
93,794		7,8,9,10,11,12-hekza hidro benzo [a]piren		1,28	

4.3. Elbistan Linyiti

4.3.1. Yüzdürme-batırma deneyleri

İri, orta ve ince boyutlarda batan ve yüzen kömürlerin hesapla birleştirilmesi ile elde edilen Elbistan linyitine ait yüzdürme-batırma eğrileri Şekil 4.50 ve Ek 4'de verilmiştir.

Ayırma yoğunluğunun artmasıyla birlikte $\pm 0,1$ yoğunlukta yüzen malzeme miktarının da artması, Elbistan linyitinin çok zor yıkanabildiğini belirtmektedir. Sadece $1,4\text{g/cm}^3$ 'de $\pm 0,1$ yoğunlukta yüzen malzeme miktarının 20'nin altında (18) olması, yıkanabilirliğin çok zor olduğunun diğer bir göstergesidir. Kül karakteristik eğrisine bakıldığında $1,65\text{ g/cm}^3$ yoğunlukta bir bükülme göstermiştir. Bu yoğunluk alındığında %35,5 küllü lave %84,73 yanabilir verimle elde edilebilmiştir. Elbistan linyitinin yıkanması gerekli olduğunda, uygulamada zorluklar yaşanacağı ve buna bağlı olarak dar tane boyutunda, çok kontrollü olarak yıkanmanın gerekliliği açıktır.

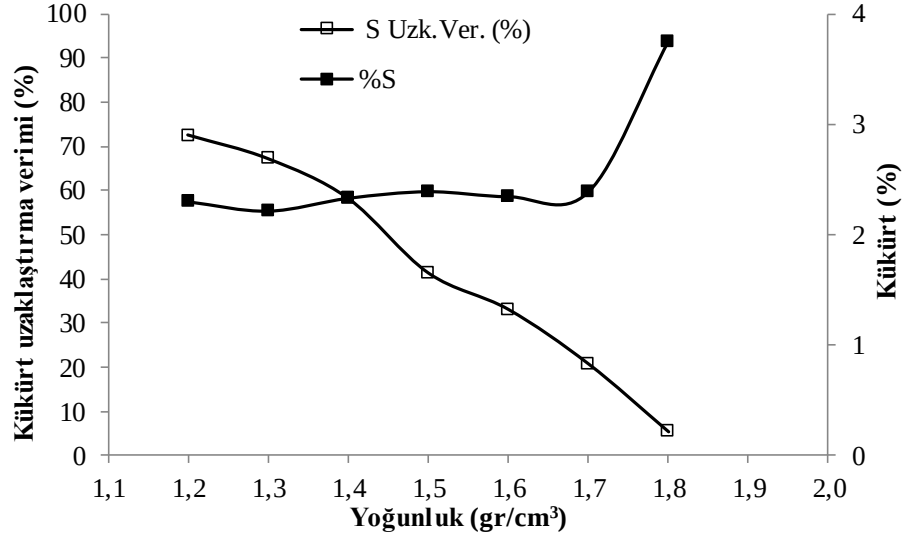


Şekil 4.50. Elbistan linyitinin hesapla birleştirilerek elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

Yumuşak linyitlerin olumsuz yanlarından bir diğeri de, Elbistan linyitinde görüldüğü gibi yıkanabilirliklerinin zor olmasıdır. Yumuşak linyitler genellikle kil içermekte ve suda şişerek dağılmakta, dolayısıyla yıkamada zorluk çıkarmaktadırlar (Kemal ve Semerkant, 1988).

Elbistan linyitinin ve birlikte bulunan kilin piknometre ile gerçekleştirilen yoğunluk analizinde sırasıyla $1,83 \text{ g/cm}^3$ ve $2,29 \text{ g/cm}^3$ bulunan özgül ağırlık değerlerinden elde edilen konsantrasyon kriteri (k) değeri 1,55 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre gravite ayırması güçleşir ve 1 mm serbestleşme boyutuna kadar çok kontrollü olarak gravite yöntemleri uygulanabilir (Önal, 1980).

Yüzdürme-batırma testlerinden elde edilen yüzen ürünlerin yoğunluğa bağlı olarak kükürt uzaklaştırma verimi değişimi Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Şekil 4.51'den görüldüğü gibi yıkama yoğunluğu arttıkça toplam kükürt uzaklaştırma verimi azalmıştır. Eğer $1,65 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip olan ağır ortamda yıkama yapılırsa, %35,5 küllü ve %84,73 yanabilir verimle elde edilen lavde %27,2 kükürt uzaklaştırma verimiyle %2,28 S elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar, yüzdürme-batırma ile Elbistan linyitinde çok ince dağılım halinde bulunan framboidal piritik kükürdün uzaklaştırılmadığını göstermektedir.

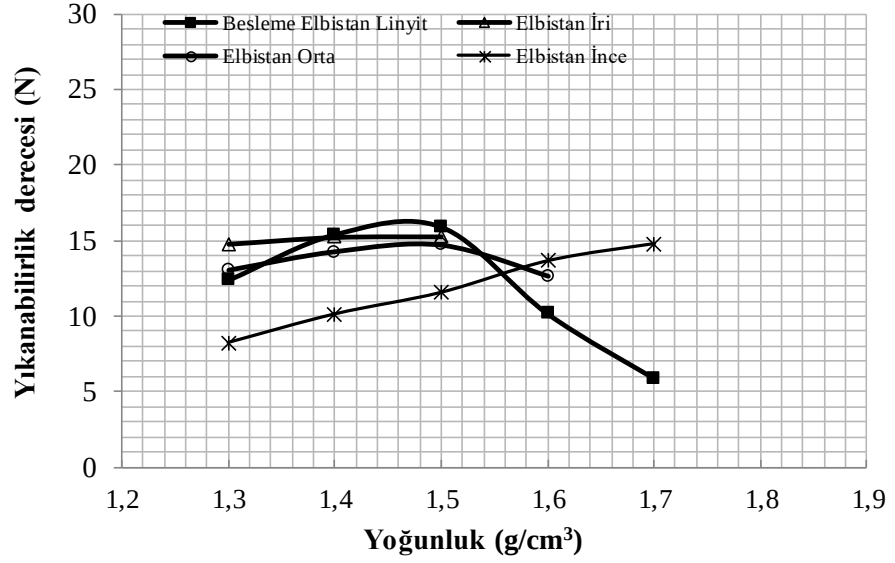


Şekil 4.51. Elbistan linyitinin yüzdürme-batırma sonuçlarına göre yüzen üründe kükürt uzaklaştırma değişimi

- **Elbistan linyitinin yıkanabilirlik indekslerinin değerlendirilmesi**

Hesaplanan yıkanabilirlik derecesi (N) değerlerine karşı her bir yüzen yoğunluğun fonksiyon grafiği Şekil 4.52’de verilmektedir. İri boyut için, optimum ayırma yoğunluğu veya optimum kesme noktası yaklaşık 1,4 g/cm³, orta boyut için 1,48 g/cm³, ince boyut için 1,7 g/cm³ ve besleme için ise 1,47 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Optimum ayırma yoğunluğunda N değerleri; ince, orta, iri ve besleme boyut için sırasıyla 14,8-14,9-15,23 ve 16,4 olarak hesaplanmıştır. Kök vd. (2001) yaptıkları araştırmada Elbistan kömürü için yıkanabilirlik derecelerini; ince boyut için 1,6 g/cm³ yoğunlukta 12,7 olarak, orta boyut için 1,4 g/cm³ yoğunlukta 16,5 ve iri boyut içinse 1,4 g/cm³ yoğunlukta 17,5 olarak hesaplamışlardır.

Optimum ayırma yoğunluğunda yıkanabilirlik sayısı (W) değeri besleme, iri, orta ve ince boyut için sırasıyla 5,96-5,19- 5,32 ve 4,84 olarak hesaplanmıştır. Abakay Temel ve Ayhan (2008), Türkiye’nin farklı bölgelerinden aldıkları linyit örnekleriyle yaptıkları çalışmada Yıkanabilirlik sayılarını 5,39 (Çayırhan-Beyazır) ile 26,88 (Manisa-Soma-Deniş) arasında hesaplamışlardır. Hesaplanan N ve W değerlerine göre, Elbistan linyitinin nispeten çok daha zor yıkanabilir özellikte olduğu ortaya çıkarılmıştır. Elbistan linyitinin yıkanabilirlik sayısı 9’un çok altında olduğu için, linyitin uygulamada kullanılabileceği üst tane boyutu 10 mm veya 10 mm’nin altındadır. Yıkama yöntemi olarak +0,5 mm kömür için ağır-ortam siklonu veya eşdeğer (spiral) cihazı kullanılmalıdır (Ünlü, 1990).

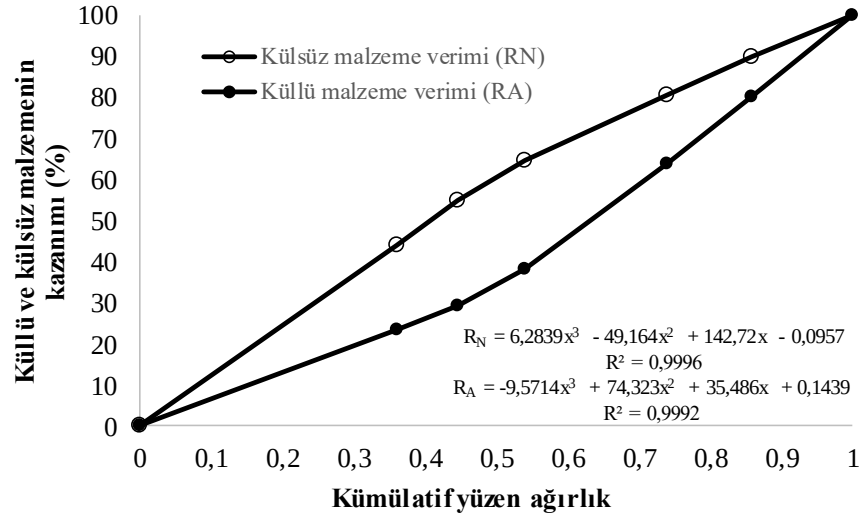


Şekil 4.52. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre yıkanabilirlik derecesi

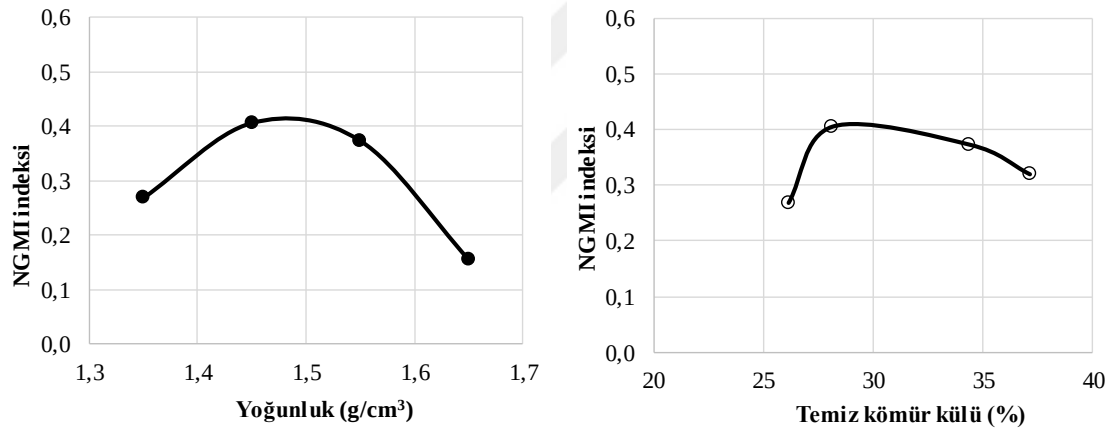
Yıkamanın kolay veya zor olduğunu belirlemek amacıyla, yıkanabilirlik sayısının dışında ayrıca yıkanabilirlik indeksi (IW) ve yakın yoğunlukta malzeme indeksi (NGMI) değerleri de hesaplanmıştır. Elbistan linyiti için kümülatif yüzen kısmın ağırlığına karşılık küllü (R_A) ve külsüz (R_N) malzeme verimleri Şekil 4.53’de verilmiştir.

Şekil 4.53’deki R_A ve R_N denklemleri kullanılarak IW değeri 10,78 ve NGMI değerleri ise 1,35-1,45-1,55 ve 1,65 g/cm³ yoğunluklar için sırasıyla 0,27-0,41-0,37 ve 0,32 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatürde kolay yıkanabilen olarak tanımlanan kömürlerle karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Örneğin; Dehghan ve Aghaei (2013), Parvadeh kömür hazırlama tesisinden aldıkları farklı boyutlara sınıflandırılmış kömür örnekleriyle yaptıkları çalışmalarda IW değerlerini 52,23 ile 57,64 arasında, NGMI değerlerini ise 0,05 ile 0,18 arasında hesaplamışlardır.

Yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri Şekil 4.54’de verilmiştir. Şekil 4.54’den görüldüğü gibi yıkanabilirliğin 1,50 g/cm³ yoğunluğa kadar zor olduğu daha yüksek yoğunluklarda ise gittikçe kolaylaştığı ve temiz kömür külünün de buna bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar yıkanabilirlik eğrileri ve diğer indeksler ile uyumludur. Hesaplanan tüm yıkanabilirlik değerleri Çizelge 4.17’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 4.53. Elbistan linyitinin küllü ve külsüz malzeme verim eğrileri



Şekil 4.54. Elbistan linyitinin yoğunluk ve temiz kömür külüne karşılık çizilen NGMI değerleri

Çizelge 4.17. Elbistan linyiti için hesaplanan yıkanabilirlik indeksleri

Ortalama yoğunluk (g/cm³)	1	1,35	1,45	1,55	1,65
Konsantrasyon kriteri	1,55				
±0,1 yoğ. yüzen malzeme miktarı		18,00	29,30	31,90	
Yakın malzeme yoğunluk indeksi (NGMI)		0,27	0,41	0,37	0,32
Yıkanabilirlik indeksi (IW/GIW)					10,78
Yıkanabilirlik sayısı (W)				5,96	

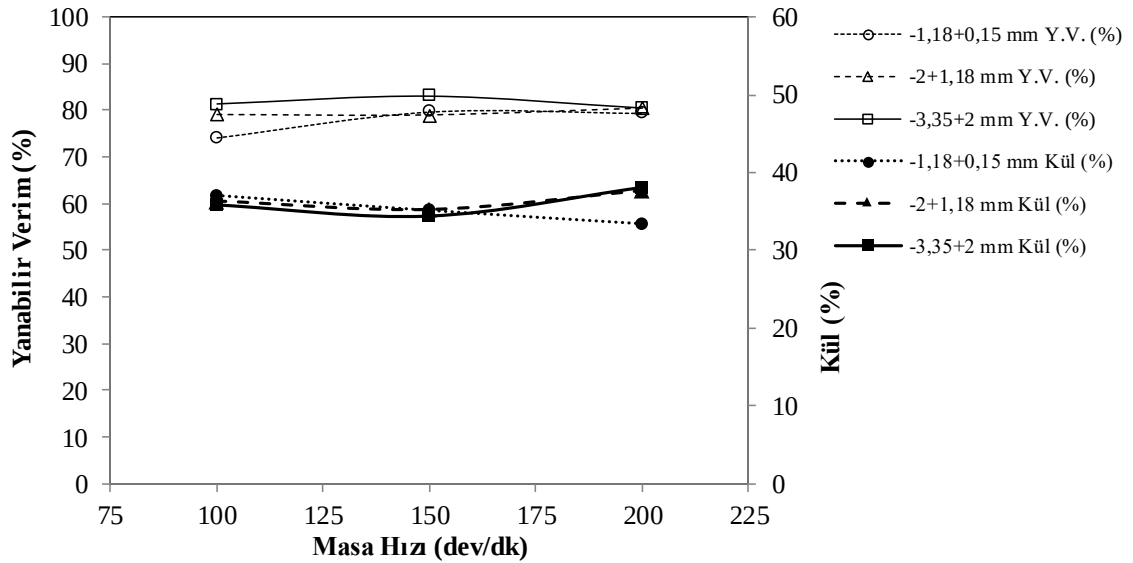
4.3.2. Sallantılı masa deneyleri

Sallantılı masa deneyleri için tüvenan linyit örneği çekiçli kırıcıdan geçirilerek, çalışma boyutları olan -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm boyut gruplarına ayrılmıştır. İri, orta ve ince boyut gruplarına ayrılan linyit örneklerine %25 katı oranında, 100, 150, 200 dev/dk masa hızlarında ve 2°, 4°, 6° masa eğimlerinde sallantılı masa deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde beslenen tane boyutlarına ait miktar ve kül değerleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Elbistan linyitinin sallantılı masa ve spirale beslenen tane boyutlarının miktar ve kül değerleri

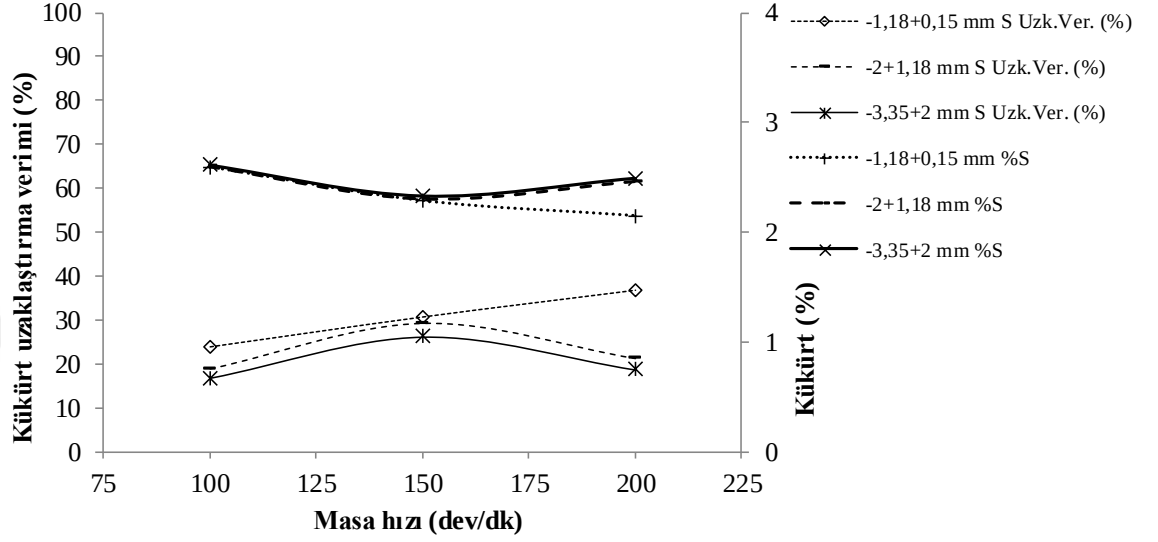
Tane boyutu (mm)	Miktar (%)	Kül (%)
-3,35+2	29,21	32,15
-2+1,18	28,04	35,67
-1,18+0,15	26,88	38,69
-0,15	15,87	62,12
Besleme	100,00	39,65

Elbistan linyitinin her bir boyut grubuna ait en uygun sarsıntı hızı ve eğim sonuçları, kül ve yanabilir verim açısından değerlendirilmiştir. Tane boyutlarına göre, sarsıntı hızı değişiminin kül ve yanabilir verimine etkileri Şekil 4.55’de gösterilmiştir. Şekil 4.55 kül içeriklerine göre değerlendirildiğinde, literatüre uygun olarak ince boyutlarda yüksek sarsıntı hızında, iri boyutlarda ise düşük masa hızlarında çalışılmasının gerektiği ve lave külü ile yanabilir verim arasında ters bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir (Önal 1980, Wills 1979, Laskowski, 2001).

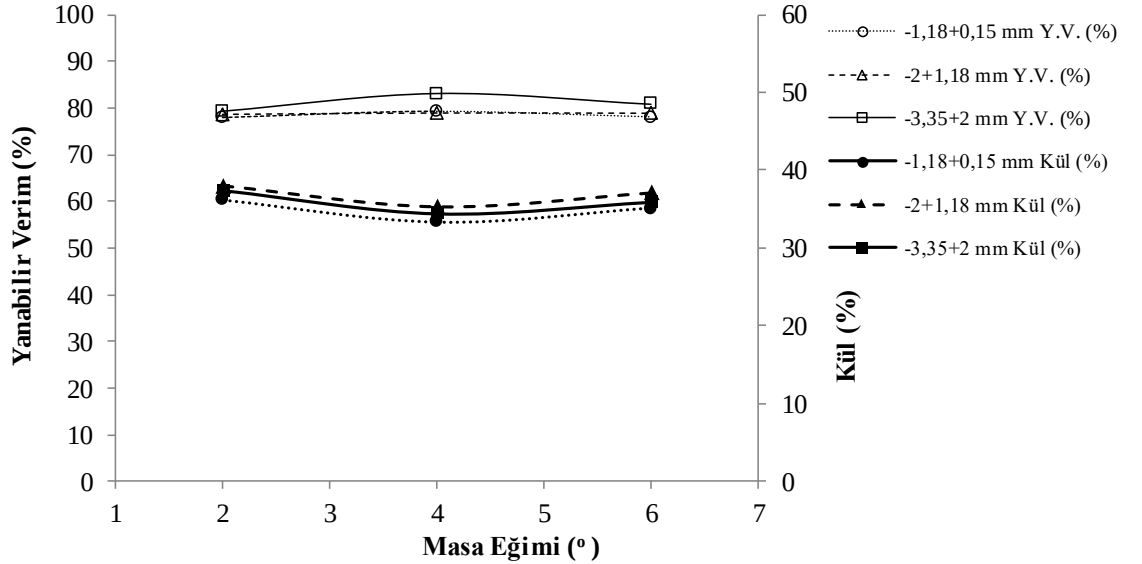


Şekil 4.55. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin, kül ve yanabilir verimine etkisi

Sallantılı masa hızının kükürt uzaklaştırılması açısından değişimi Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Şekil 4.56'dan görüldüğü gibi, tüm masa hızlarında lavede kükürt içerikleri %2,15-%2,61 kükürt uzaklaştırma verimleri ise %16,83-%36,81 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar sallantılı masa hızının hem toplam kükürt hem de kükürt uzaklaştırması açısından yeterli olmadığını göstermiştir.



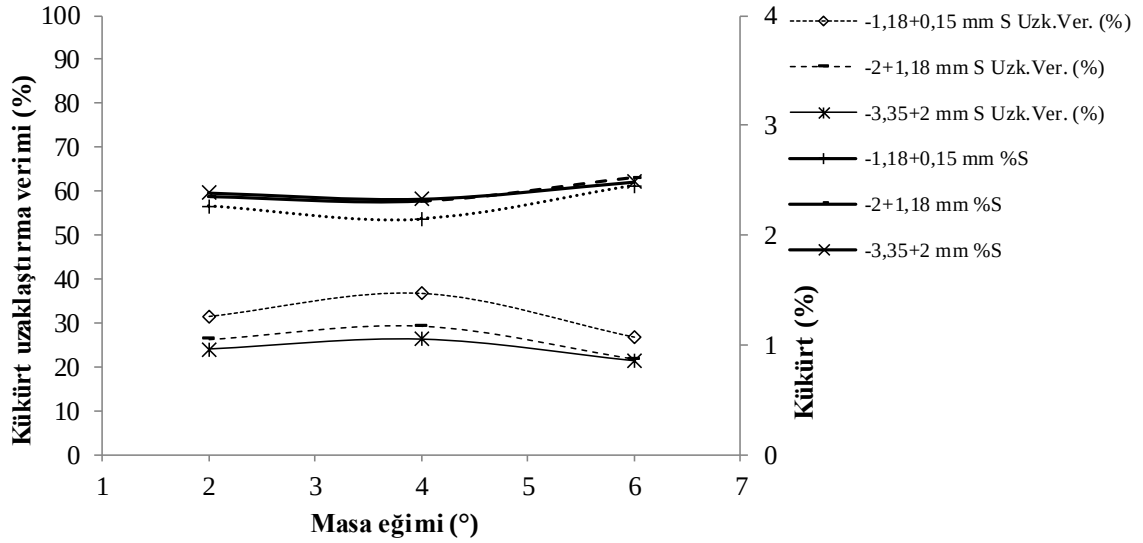
Şekil 4.56. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 4° masa eğiminde, masa hızı değişiminin, kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi



Şekil 4.57. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kül ve yanabilir verimine etkisi

Optimum masa hızlarında gerçekleştirilen masa eğimi deneylerinde, kül ve yanabilir verim değişimini gösteren ilişki Şekil 4.57’de gösterilmiştir. Şekil 4.57’den görüldüğü gibi, tüm boyutlarda lave külü açısından 4° eğimde çalışılması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak kül açısından değerlendirildiğinde, masa hızının masa eğiminden daha etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Bununla beraber, sallantılı masa sonuçları kül ayırımının başarılı bir şekilde gerçekleştirilemediğini göstermektedir. Sallantılı masa deneyleri sonucunda üç boyuttan alınan en iyi lavelerin birleştirilmesiyle, %39,65 küllü besleme linyitinden %34,34 küllü lave %90,52 yanabilir verimle kazanılmıştır. Sallantılı masa deneyine ait sonuçlar Ek 5’de verilmiştir.

Sallantılı masa eğiminin piritik kükürdün uzaklaştırılması açısından değişimi Şekil 4.58’de gösterilmiştir. İri, orta ve ince boyutlarda laveler sırasıyla %2,33 S, %2,31 S ve %2,15 S içeriğiyle ve %26,22, %29,3, %36,81 kükürt uzaklaştırma verimleriyle kazanılmıştır. Lavelerin birleştirilmesiyle %2,26 S içerikli lave %30,65 kükürt uzaklaştırma verimiyle elde edilebilmiştir. Bu sonuçlar kül uzaklaştırmada olduğu gibi, kükürt uzaklaştırma açısından da masa ayırımının yetersiz olduğunu göstermiştir.



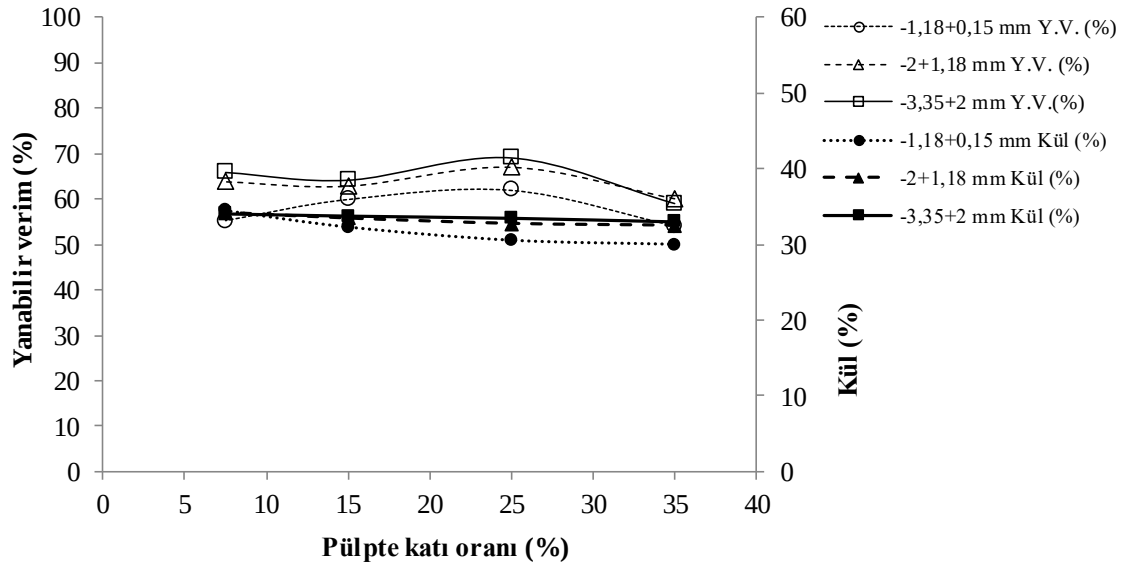
Şekil 4.58. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre 150-200 dev/dk masa hızlarında, masa eğimi değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

4.3.3. Reichert spirali deneyleri

Reichert spirali kullanılarak -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane boyut grupları ile pülpte katı oranı ve ayırma bıçak konumu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tabaka halinde akan akışkan ortamda yapılan gravite ayırmalarında önemli bir parametre olan katı oranını belirlemek amacıyla, tüm tane boylarında lave bıçak açılığı 150° sabit tutularak %7,5, %15, %25 ve %35’lik pülpte katı oranları denenmiştir. -3,35+2 mm, -2+1,18 mm ve -1,18+0,15 mm tane

boyutundaki örnekler için, pülpte katı oranı değiştirilerek elde edilen Reichert spiral sonuçları Şekil 4.59 ve Ek 6'da verilmiştir.

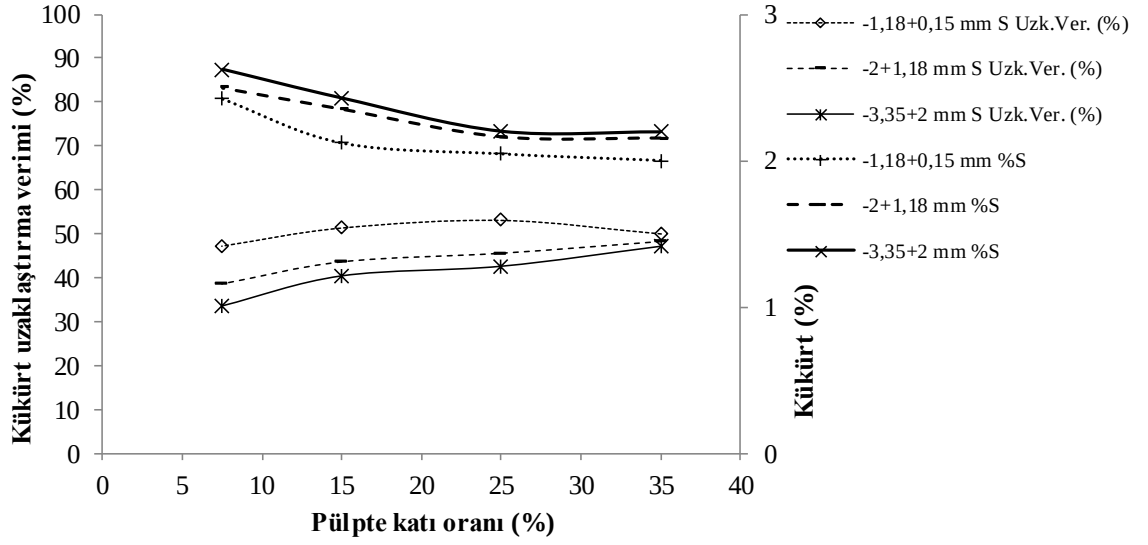
Reichert spirali ile gerçekleştirilen tüm boyut gruplarında, katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimlerinin tane boyutlarından bağımsız olarak değiştiği Şekil 4.59'da görülmektedir. Tüm tane boyutlarında en düşük lave külleri ve en yüksek yanabilir verimleri %25 katı oranında elde edilmiştir. Ekonomiklik açısından %35 katı oranında çalışmak da mümkündür. Ancak yanabilir verimleri düşük olduğundan, %25 katı oranının optimum katı oranı olarak seçilmesine karar verilmiştir. Reichert spirali için seçilen pülpte katı oranı, Alpagut-Dodurga linyitleri ile çalışan Altun ve Hiçyılmaz (2002) ve Zonguldak kömürü ile çalışan Öney vd. (2014)'nin sonuçları ile uyumludur.



Şekil 4.59. Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranına bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

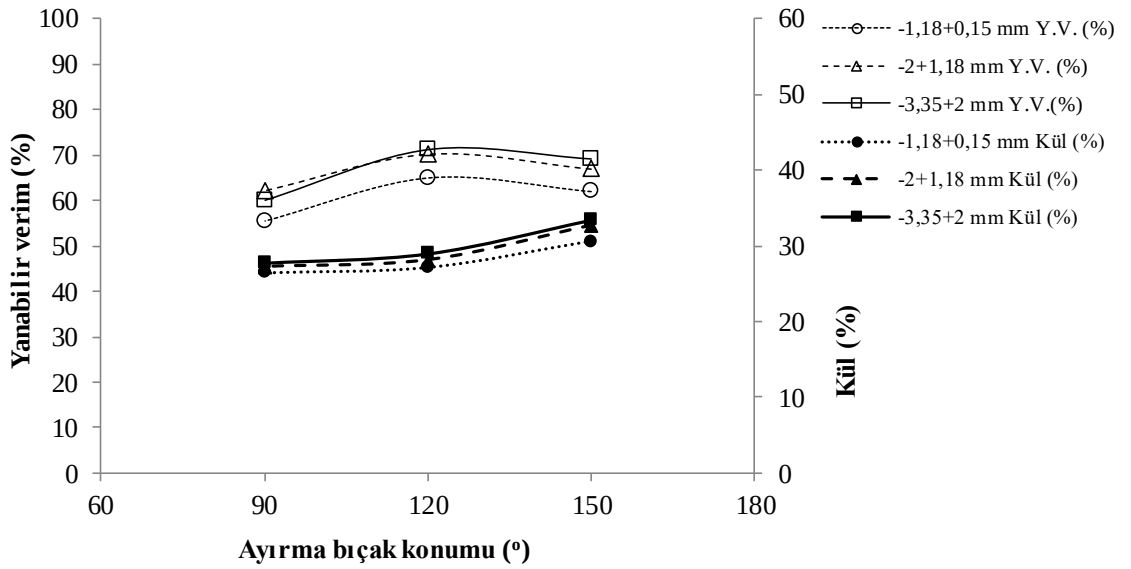
Reichert spirali ile yapılan katı oranı belirleme deneylerindeki tüm boyutların lave küllerinin birleştirilmesiyle %32,32 küllü lave %76,21 yanabilir verimle kazanılmıştır. Bu sonuçlar sallantılı masa ile karşılaştırıldığında göreceli olarak daha iyi olmasına rağmen, yine de istenen seviyede bir ayırım sağlanamamıştır.

Şekil 4.60'dan görüldüğü gibi tüm tane boylarında en düşük kükürt içeriği ve en yüksek kükürt uzaklaştırma veriminin %25 katı oranında olduğu belirlenmiştir. Görüleceği üzere, katı oranına bağlı engelli çöküş şartlarının etkili olmadığı anlaşılmıştır. Dolayısıyla bundan sonraki deneylerde bıçak ayarının etkisi araştırılmıştır. Tane boyutlarına ait lavelerin birleştirilmesiyle, %2,72 S içeren besleme linyitinden %46,8 kükürt uzaklaştırma verimiyle %2,14 S içeren lave kazanılmıştır.



Şekil 4.60. Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre 150° bıçak açıklığında, pülpte katı oranı değişiminin kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

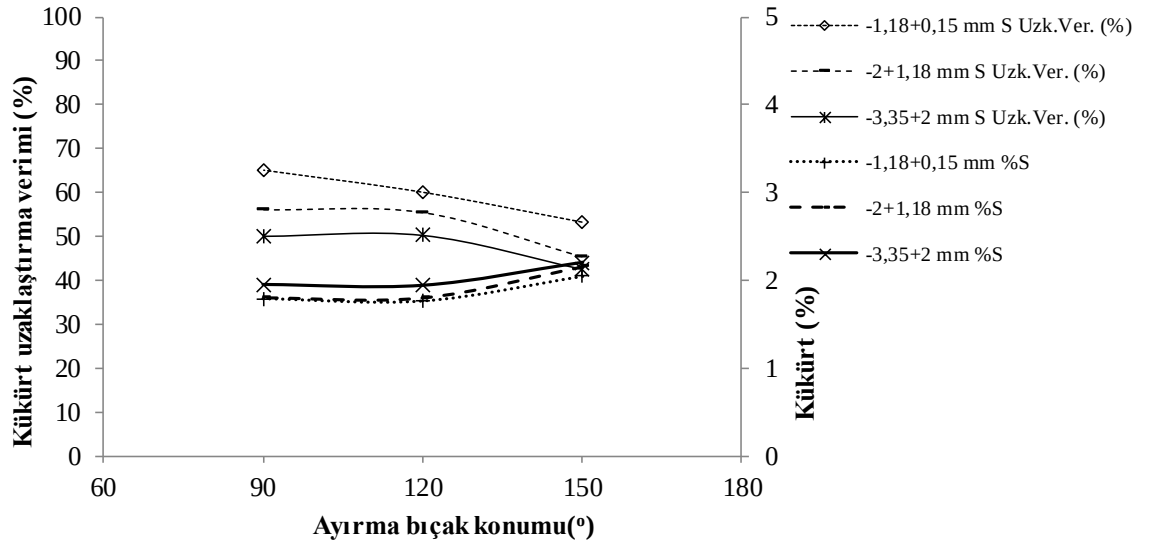
Pülpte katı oranı belirlendikten sonra, lave bıçak ayarları 90° ve 120° olacak şekilde değiştirilerek deneylere devam edilmiştir. Bıçak ayarlarının değişimine göre elde edilen Reichert sonuçları Şekil 4.61’de gösterilmiştir.



Şekil 4.61. Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumuna bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

Şekil 4.61’den görüldüğü gibi tüm tane boyutlarında en düşük lave kül değerleri 90°’lik bıçak konumundadır. Deneyler sonucunda %39,65 olan besleme küllü linyitten, 90° bıçak konumuyla %27,19 küllü lave ve %69,47 yanabilir verimle elde edilirken, 120° bıçak konumunda ise %28,15 küllü lave %78,92 yanabilir verimle kazanılabilmektedir. Diğer bir deyişle bıçak konumunun 120°’den 90°’ye getirilmesiyle %1 kül azalmasına karşılık %10 yanabilir verim kaybı bulunmuştur. Elbistan linyitinin yüksek kül içeriği ve ince boyutta serbestleşen piritik kükürt bulunması ve ayrıca piroliz beslemesinde düşük kül içeriği istenmesi nedenleriyle önceliğin kül uzaklaştırmaya verilmesi uygun görülmüştür. Ancak yüksek yanabilir verimlerinden dolayı 120° bıçak açıklığı da seçilebilir. Diğer linyitlerde olduğu gibi gravite ayırmasında en uygun ayırma yöntemi Reichert spirali olmasına rağmen, Elbistan linyitinden kül uzaklaştırılması göreceli olarak başarılı değildir.

Şekil 4.62’de ayırma bıçak konumuna bağlı olarak kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimi değişimi gösterilmiştir. Şekil 4.62’den görüldüğü gibi, ayırıcı bıçağın 90° ve 120° konumları karşılaştırıldığında tüm boyutlarda hem kükürt içeriğinin hem de kükürt uzaklaştırma verimlerinin 90°’de daha iyi olduğu belirlenmiştir.



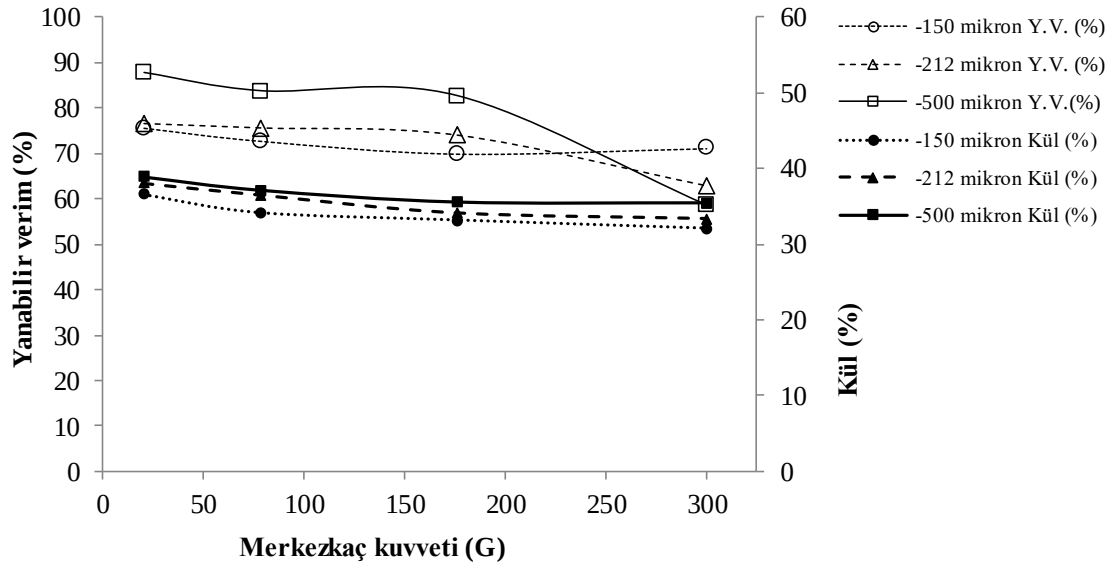
Şekil 4.62. Elbistan linyitinin Reichert spiralinde tane boyutlarına göre %25 katı oranında, bıçak konumunun lavede kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimine etkisi

Deneyler sonucunda %2,72 S içeren besleme linyitinden, 90° bıçak konumuyla %1,8 S içerikli lave %56,73 kükürt uzaklaştırma verimiyle, 120° bıçak konumunda ise %1,84 S içerikli lave %55 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Kül ve toplam kükürt uzaklaştırma açısından bıçak ayarları konumunun önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Reichert spirali

sonuçlarına göre, Elbistan linyiti için kükürt uzaklaştırma sonuçları göreceli olarak başarılıdır sonucuna varılabilir.

4.3.4. Falcon konsantratör deneyleri

Falcon konsantratör deneylerinde -500 μm , -212 μm ve -150 μm olmak üzere 3 farklı tane boyutu ve 20, 78, 176 ve 300 G olmak üzere 4 farklı merkezkaç kuvvetinde (G) çalışılmıştır. 500 μm , 212 μm ve 150 μm altına indirilen, Elbistan linyitinin merkezkaç kuvvetlerine bağlı olarak gerçekleştirilen Falcon konsantratör deney sonuçları Şekil 4.63’de verilmektedir. Şekil 4.63’den görüldüğü gibi, tüm boyutlarda Falcon konsantratör ile gerçekleştirilen ayırım çalışmalarında arzulanan kül azaltma değerlerine ulaşılamamıştır. Bunun temel nedeninin çok ince boyuttaki killerin üst akıma kapılarak laveye kaçması olduğu düşünülmektedir. Falcon konsantratörden elde edilen lavelerin toplam kükürt içeriklerinin %2,69-%2,71 arasında değişmesinden dolayı, kükürt uzaklaştırmanın da başarısız olduğu belirlenmiştir. Bulunan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir (Oruç vd., 2010; Boylu 2013). Falcon konsantratörünün başarılı olduğu çalışmalar genellikle sert linyitler ile gerçekleştirilmiştir (Honaker, 1998; Honaker vd., 2000; Tao vd., 2006; İbrahim vd., 2014). Falcon deneylerine ait sonuçlar Ek 7’de verilmiştir.

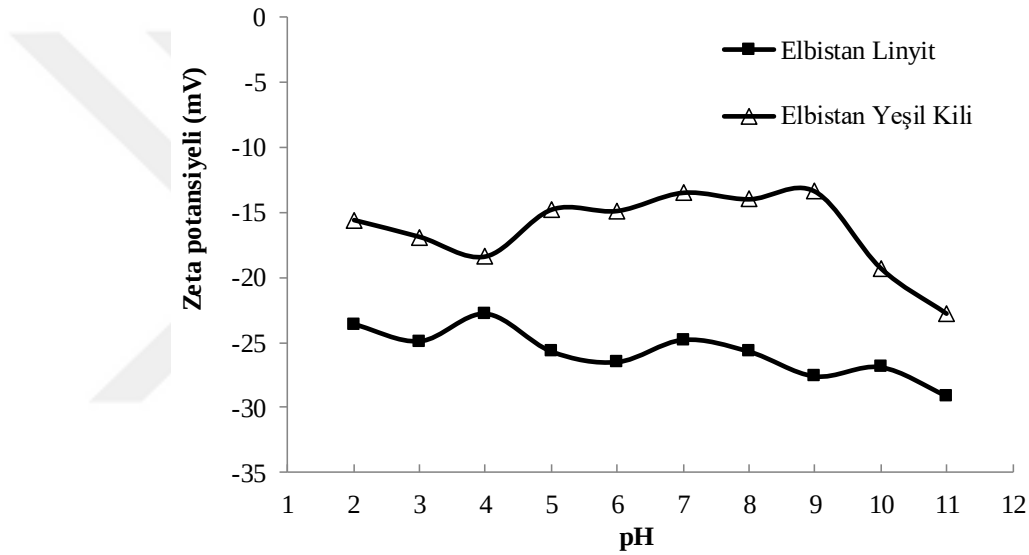


Şekil 4.63. Elbistan linyitinin Falcon konsantratörde tane boyutlarına göre gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve yanabilir verim değişimi

4.3.5. Flotasyon deneyleri

Flotasyon öncesinde Elbistan linyiti ve beraber bulunan kilin yüzü yükü davranışlarını belirlemek amacıyla zeta potansiyel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. pH'a bağlı olarak ölçülen zeta potansiyeli sonuçları Şekil 4.64'de verilmiştir.

Yüzey yükü sonuçları Dinçer vd. (1990)'nin seçimli aglomerasyon yapmak amacıyla ölçtüğü yüzey yükü sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Linyitin yüzey yükünün daha negatif olması nedeniyle flotasyon için kullanılan nötr veya nötre yakın yağların kullanılması durumunda ayırımın başarılı olmayacağı beklenmelidir. Kömürlerin polimerler ile olan adsorpsiyon mekanizmasının elektrostatik çekimden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Lawskovski 2001, Dinçer vd., 1990).

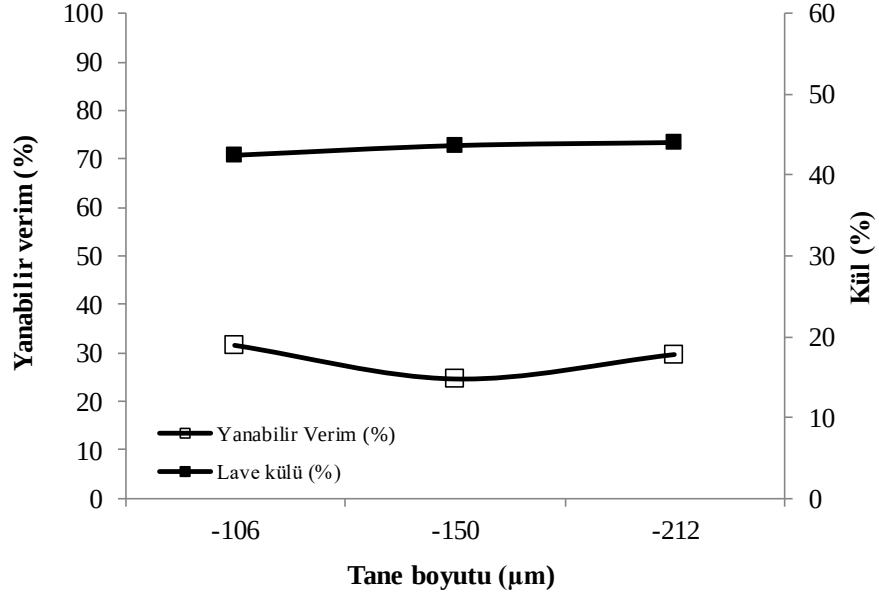


Şekil 4.64. Elbistan linyiti ve kilinin pH'a bağlı olarak zeta potansiyel değerleri

Oksitlenmeden kaynaklanabilecek hidrofilikliği azaltmak amacıyla, öğütme deneyden hemen önce yapılmış ve yeni yüzeylerin oluşması sağlanmıştır. Flotasyon deneyleri tamamı 212 µm, 150 µm ve 106 µm boyutunun altına öğütülmüş olan 3 farklı boyutta; gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot olmak üzere 3 farklı toplayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Flotasyonda pülpte katı oranı %20, pervane hızı 1400 dev/dk, pH :7, 1000 g/ton Na₂SiO₃ bastırıcı, 150 g/ton MIBC köpürtücü miktarı sabit tutulmuştur. Flotasyon deneylerinde 2000 g/ton gazyağı, mazot ve gazyağı+mazot toplayıcı olarak denenmiştir. Pülp 3 dakika karıştırıldıktan sonra, 3 dakika bastırıcı ve 3 dakika toplayıcı ile koşullandırılmış ve 6 dakika süreyle köpük alınmıştır.

Elbistan linyitinin tane boyutu ile yapılan flotasyon deney sonuçları Şekil 4.65'de gösterilmiştir. Şekil 4.65'e göre zeta potansiyeli sonuçlarına uyumlu olarak ters flotasyon gerçekleşmiştir. Külün %39,65'den %42-%44'lere yükselmesi flotasyonda killerin yüzdürüldüğünü göstermiştir. Yumuşak linyitlerin flotasyon özelliklerinin yok denecek kadar az

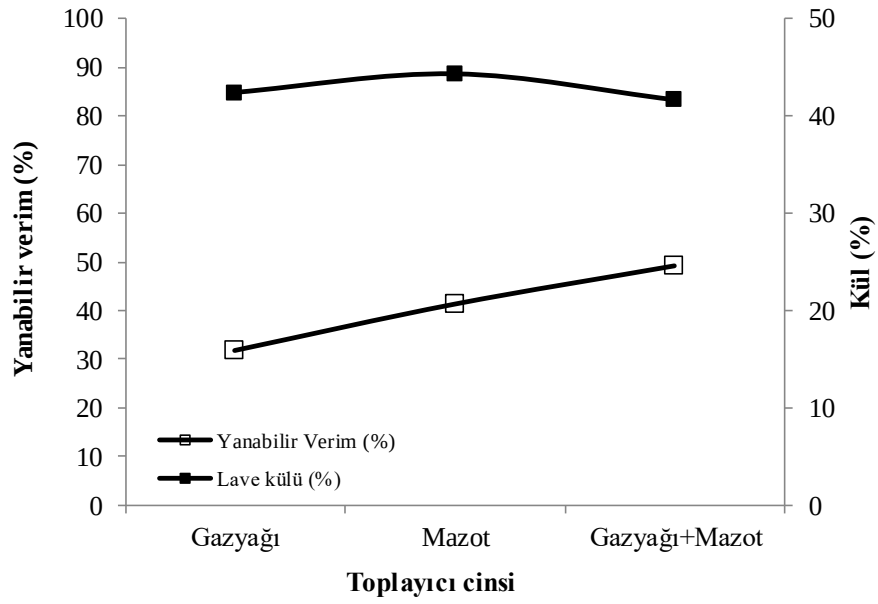
olduğu bilinmektedir. Ayrıca linyitlerin oksitlenmelerinin yüksek olması da flotasyonu zorlaştırmaktadır (Laskowski ve Ralston 1992; Laskowski, 2001). Flotasyon deneylerine ait sonuçlar Ek 8’de verilmiştir.



Şekil 4.65. Elbistan linyitinin gazyağı ile flotasyonunda tane boyutuna bağlı olarak lave külü ve yanabilir verim değişimi

Tane boyutuna göre gerçekleştirilen flotasyon deneylerinde seçimliliği sağlamak amacıyla toplayıcı çeşidinin taranmasına karar verilmiştir. Elbistan linyitinin toplayıcı çeşidine göre gerçekleştirilen flotasyon deney sonuçları Şekil 4.66’da gösterilmiştir.

Şekil 4.66’da seçimliliği arttırmak amacıyla yapılan flotasyon deneylerinde de beklenen başarı elde edilememiştir. Linyit kömürlerinin çok zor yüzebildiği veya yüzmediği literatürde de görülmektedir (Sivrikaya, 2014; Temel vd., 2010; Ceylan ve Küçük, 2004). Flotasyon deneylerinde başarı elde edilemediğinden dolayı ayrıntılı çalışmalar yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Dinçer vd. (1990) Elbistan linyiti ile yaptıkları çalışmada karıştırarak dağıtma ve seçimli salkımlaştırma ile beslemeye göre %50 oranında, %16,45 kül içerikli ve 5560 kcal/kg ısı değerine sahip lave elde etmişlerdir. Yine Kurumuş ve Yıldırım (2004), Elbistan linyiti ile yaptıkları çalışmada agloflotasyon ile beslemeye göre %39,75 oranında, %29,80 kül içerikli ve 4152 kcal/kg ısı değerli lave kazanmışlardır. Dolayısıyla seçimli aglomerasyon/agloflotasyon çalışmalarının araştırılmasında yarar görülmektedir.



Şekil 4.66. -106 µm tane boyutlu Elbistan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre lave külü ve yanabilir verim değişimi

4.3.6. Zenginleştirme deney sonuçlarının karşılaştırılması

Zenginleştirme işlemleri, tüvenan linyitin külünü azaltarak teknolojik ürün elde edilmesini kolaylaştırmak amacıyla yapılmıştır. Külü azaltılan linyitlerin kaliteli piroliz ve sıvılaştırma ürünü elde edilmesine yönelik çalışmalarda kullanılmak üzere, gerçekleştirilen tüm zenginleştirme sonuçları Çizelge 4.19’da karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.19. Elbistan linyitinin zenginleştirme sonuçlarının karşılaştırılması

Zenginleştirme yöntemleri	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Toplam kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	AİD (kcal/kg)
*Yüzdürme-batırma testleri (1,65 g/cm ³ de yüzen)	35,50	84,73	2,28	27,20	3150
*Sallantılı masa	34,34	70,52	2,26	30,65	3300
*Reichert spirali	27,19	69,47	1,80	56,73	4010
*Falcon konsantratör	33,62	64,19	2,72	33,51	3390
Flotasyon	42,36	31,64	2,70	20,19	2550
İşleme girmeyen (-0,15 mm)	62,12	9,96	3,95	-	Okunamadı
Elbistan linyiti	39,65	100	2,72	-	2813

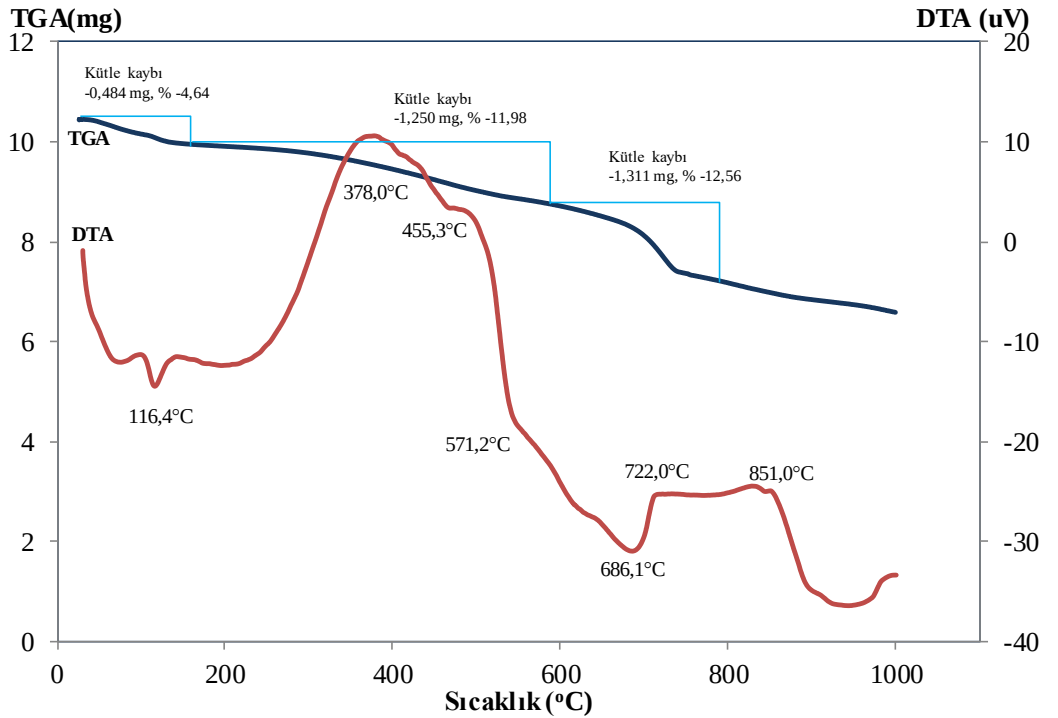
* Birleştirilmiş tane boyutlarına göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.19'a göre, kül ve toplam kükürt giderimi açısından gravite zenginleştirme yöntemleriyle kül içerikleri %27,19-%35,50 ve kükürt içerikleri %1,8-%2,72 arasında değiştiğinden, kül ve kükürt gideriminin göreceli olarak başarılı olduğu söylenemez. Ancak gravite zenginleştirmesinin kendi içerisinde en başarılı olanı Reichert spiralidir. Reichert spirali ile %39,65 olan kül içeriği %27,19'a %69,47 yanabilir verimle, %2,72 olan kükürt içeriği ise %1,80'e %56,73 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Çok ince boyutta kil minerallerinin ve küresel piritin linyit içerisine karışmasının, bu ayırımın zor olmasının temel nedeni olduğu düşünülmektedir (Şekil 3.16). Bununla beraber flotasyon yöntemiyle de seçimli bir ayırımın olmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla zenginleştirmede amaç kül ve kükürdü azaltarak piroliz ve sıvılaştırma yöntemlerine malzeme hazırlamak olduğundan, nihai hedefe yönelik olarak Reichert spiralinin seçilmesinin uygun olduğuna karar verilmiştir.

4.3.7. Piroliz deneyleri

Zenginleştirme yönteminin piroliz ürünlerinin verimine etkisini belirlemek amacıyla önce tüvenan linyit örnekleri, daha sonra ise en iyi zenginleştirme ürününün piroliz deneyleri yapılmıştır. Piroliz deneylerinde optimum tane boyutu, piroliz sıcaklığı ve süresinin etkisi test edilmiştir. Piroliz deneylerine ait tüm sonuçlar Ek 9'da verilmiştir.

Piroliz deneyleri azot (N₂) gazı ortamında gerçekleştirildiğinden, Elbistan linyitinin azot ortamındaki termogravimetrik analizi (DTA-TGA) Şekil 4.67'de verilmiştir.

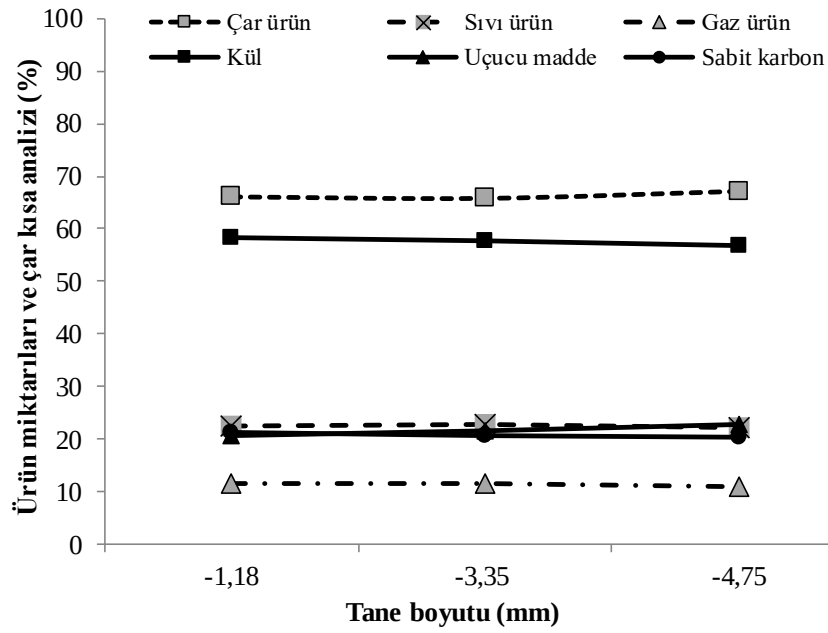


Şekil 4.67. Elbistan linyitinin azot atmosferinde sıcaklığa bağlı olarak termal gravimetri değişimi

Şekil 4.67'deki DTA eğrisinde 3 bölge görülmektedir. Termogram eğrisinde yaklaşık 116°C'de görülen bünye nemine bağlı olan pik 1.bölgeyi, 378°C-571°C'deki pikler uçucu madde çıkışı olan 2.bölgeyi, CO₃ parçalanmasının görüldüğü 686°C ve 722°C'ler arasındaki bölge 3.bölgeyi göstermektedir. TGA eğrisinden uçucu madde ve katranın çıktığı 2.bölgede ağırlık kaybı yaklaşık olarak %11,98 olarak belirlenmiştir.

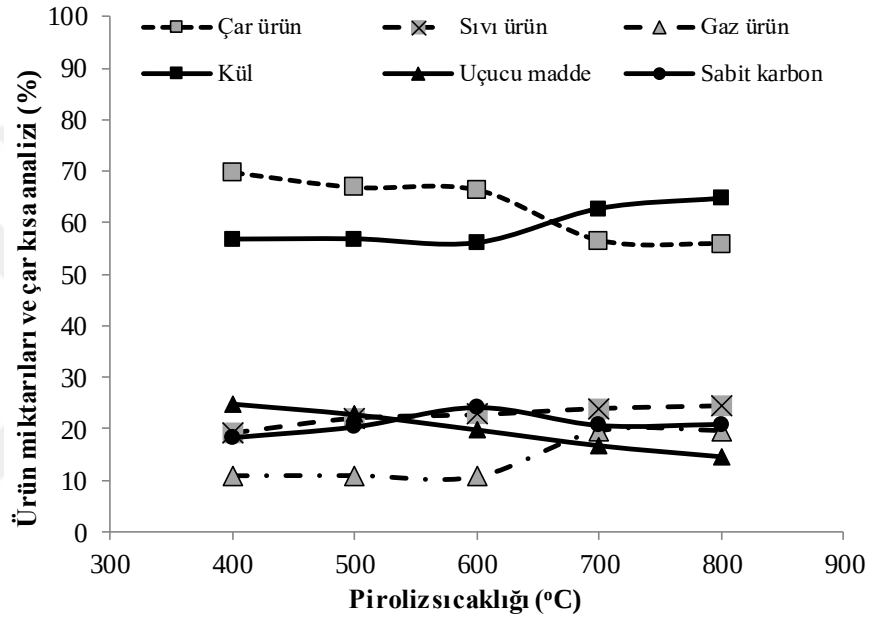
Çalışılacak tane boyutunu belirleyebilmek amacıyla, kömür numunelerinin tamamı 4,75 mm, 3,35 mm ve 1,18 mm tane boyutlarının altına indirilerek, 200 ml/dk N₂ gazı akışında, 3°C/dk ısıtma hızıyla, 500°C'de 30 dakika süreyle piroliz deneyleri yapılmıştır. Elbistan linyitinin piroliz deneylerinin tane boyutuna göre ürün verimi değişimleri ve kısa analiz sonuçları Şekil 4.68'de verilmiştir.

Şekil 4.68'de verilen piroliz deney sonuçları incelendiğinde, tane boyutuna bağlı olarak piroliz ürün verimlerinde anlamlı bir değişikliğin olmadığı belirlenmiştir. Ekonomiklik açısından -4,75 mm boyutunun seçilmesinin uygun olduğu düşünülmüştür. Bu boyutta %66,97 çar ürün, %22,11 sıvı ve %10,92 gaz verimi elde edilmiştir. Beslemenin külü %39,65 iken çar ürünün külü %56,13'e, sabit karbonu ise %17,49'dan %24,10'a yükselmiştir.



Şekil 4.68. Elbistan linyitinin 500°C sıcaklık ve 30 dakika piroliz süresinde farklı tane boyutlarında ürün verimleri ve çar kısa analiz değişimi

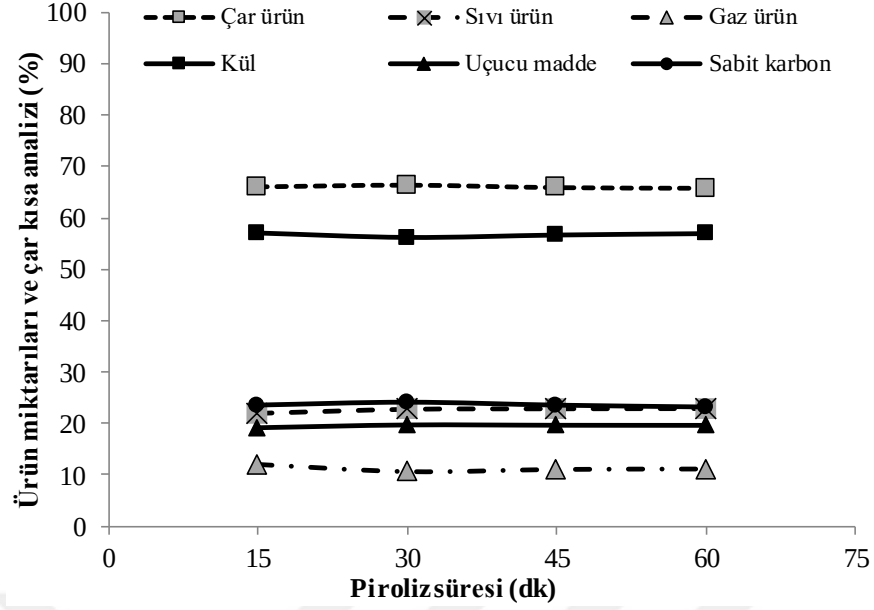
-4,75 mm tane boyutunda 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C’de piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz sıcaklığına ait deney sonuçları Şekil 4.69’da gösterilmiştir. Şekil 4.71’de Elbistan linyiti için literatüre uygun olarak piroliz sıcaklık artışına bağlı olarak, çar ürün verimi azalırken sıvı ve gaz ürün verimleri artış göstermiştir (Wei vd., 2012; He vd., 2015; Lievens vd., 2013; Li vd., 2015). Sabit karbon içeriğinin en yüksek (%24,1) ve çar ürün külünün en az (%56,13) olduğu 600°C’nin piroliz sıcaklığı olarak alınmasına karar verilmiştir. Ceylan (1991), havada kuru bazda %20 kül içeren Elbistan linyiti ile yaptığı piroliz deneylerinde optimum sıcaklığı 500°C olarak belirlemiştir.



Şekil 4.69. Elbistan linyitinin -4,75 mm tane boyutu ve 30 dakika piroliz süresinde sıcaklığa göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analizi değişimi

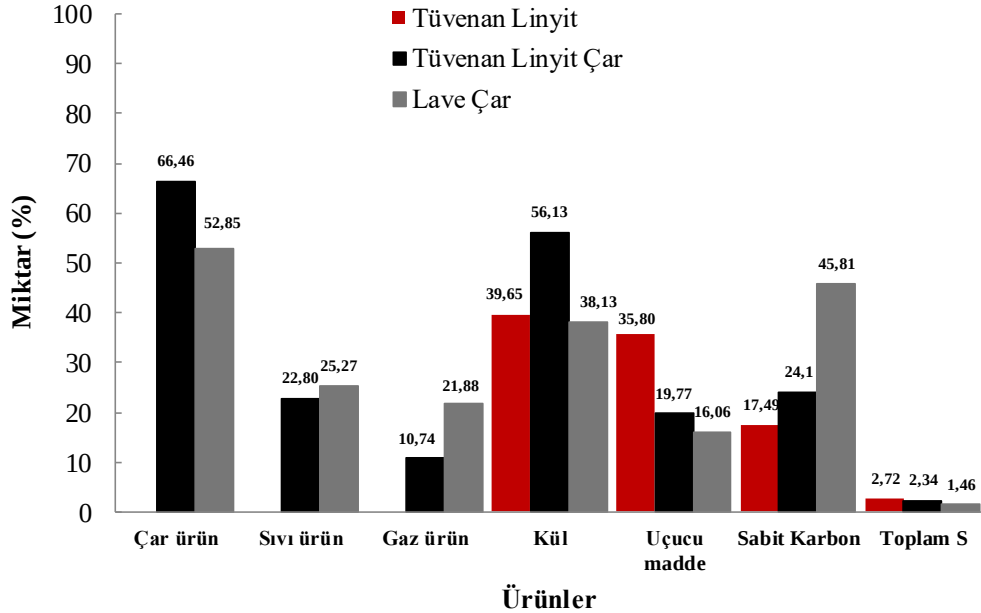
Fırın 600°C’ye ulaştıktan sonra 15, 30, 45 ve 60 dakika süreyle bekletilen numunelerin piroliz deney sonuçları Şekil 4.70’de gösterilmiştir. Şekil 4.70’den Elbistan linyitinin ürün verimleri üzerine piroliz süresinin önemli bir etkisi olmadığından, ekonomik açıdan piroliz süresinin 30 dakika seçilmesinin uygun olduğu düşünülmüştür.

Optimum piroliz deneyleri sonucunda Elbistan linyiti için, tane boyutunun -4,75 mm, piroliz sıcaklığının 600°C ve piroliz süresinin 30 dakika olarak alınmasına karar verilmiştir.



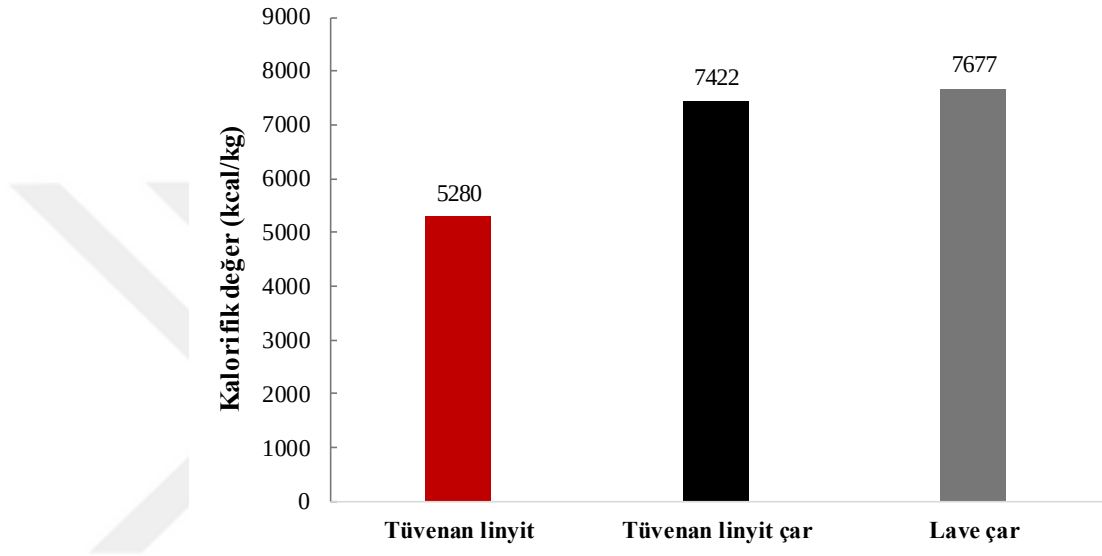
Şekil 4.70. Elbistan linyitinin -4,75 mm tane boyutunda ve 600°C sıcaklıkta piroliz süresine göre ürün verimleri ve çar ürünün kısa analiz değişimi

Zenginleştirme yönteminin piroliz ürünlerine etkisini belirlemek amacıyla, Reichert spiralinden elde edilmiş lavenin belirlenen optimum çalışma şartlarında piroliz deneyleri gerçekleştirilmiştir. Piroliz deneylerinin tüvenan linyite göre karşılaştırılması Şekil 4.71’de, kalorifik değerler ise Şekil 4.72’de verilmiştir.



Şekil 4.71. Tüvenan Elbistan linyitinin ve Reichert lavesinin piroliz ürün verimi ve kısa analiz değişimleri

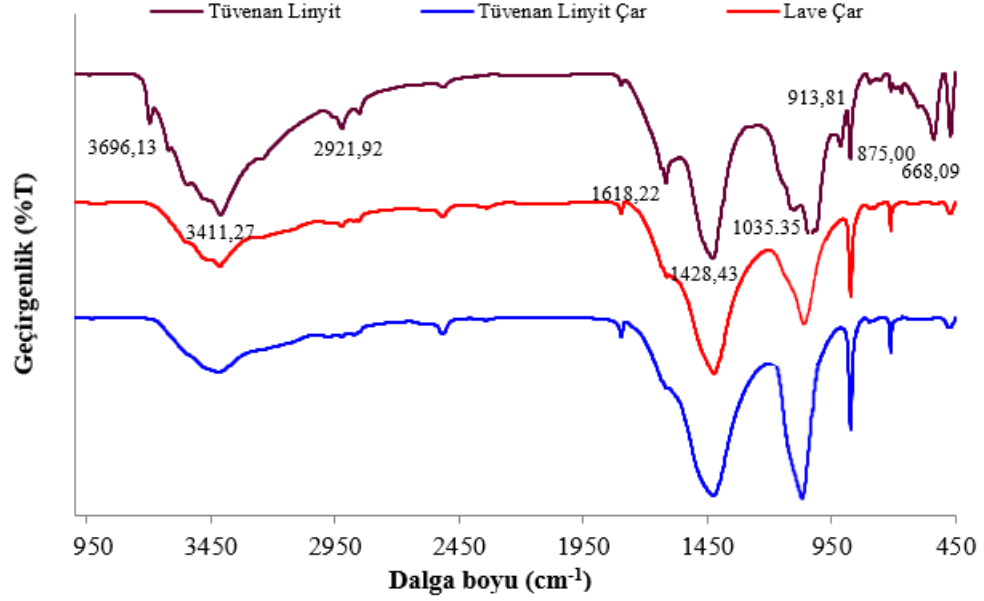
Şekil 4.71 incelendiğinde, Elbistan linyitinin Reichert spirali zenginleştirilmesiyle yapılan piroliz deneylerinde, tüvenan linyite göre çar üründe %13,61 azalma, sıvı üründe %2,47 ve gaz üründe ise %11,14 artış olduğu tespit edilmiştir. Çar ürünün kısa analizinde kül içeriği %56,13'ten %38,13'e azalırken, sabit karbonun içeriği %24,10'dan %45,81'e yükselmiştir. Tüvenan Elbistan linyitinin pirolizi sonucunda elde edilen çar ürünün kalorifik değeri kuru-külsüz bazda 7422 kcal/kg iken, lave ürünün pirolizi sonucunda kalorifik değer 7677 kcal/kg'a yükselmiştir. Bu durumda kalori değerinde yaklaşık 255 kcal/kg'lık bir artış hesaplanmıştır (Şekil 4.72).



Şekil 4.72. Tüvenan Elbistan linyiti, tüvenan linyit çarı ve Reichert lave çarının kalorifik değerleri

Elbistan linyitinin tüvenan ve lave halde piroliz edilmesiyle çar üründe sırasıyla %2,34 S ve %1,46 S elde edilmiştir. Tüvenan linyitin havada kuru bazda toplam kükürt içeriğinin %2,72 ve kalorisinin 5280 kcal/kg olduğu düşünülürse, tüvenan ve piroliz ürünlerin her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,52 %S/1000 kcal, 0,32 %S/1000 kcal ve 0,19 %S/1000 kcal olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ve kısa analiz sonuçları, piroliz ürünlerinden çar ürünün kullanılmasını teorik olarak mümkün hale getirmiştir. Ancak sıvı ürün miktarının arttırılmasına yönelik ayrıntılı araştırmaların yapılması gerektiği anlaşılmıştır.

Piroliz deneylerinin sonuçlarının daha iyi açıklanabilmesi amacıyla, Elbistan linyitine ait tüvenan linyit, tüvenan piroliz ve lave piroliz ürünlerinden elde edilen çar ürünlerin FTIR analiz sonuçları Şekil 4.73' de gösterilmiştir.



Şekil 4.73. Elbistan linyitine ait tüvenan, tüvenan piroliz ve lave piroliz çar ürünlerin FTIR analiz sonuçları

Şekil 4.73 incelendiğinde, linyitin ve lavenin çar ürünlerinde, tüvenan linyitte kaydedilen 3696 cm^{-1} ve 2922 cm^{-1} civarındaki alifatik yapıya ait karakteristik C-H piklerinin kaybolduğu gözlenmiştir. Bu durum piroliz işlemi sırasında birçok C-C bağın bozularak parçalandığına işaret etmektedir. Piklerin şiddetindeki azalmanın uçucu madde çıkışına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Ayrıca 1428 cm^{-1} civarında görülen pikin şiddetinde bir artış görülmüştür. Bu da çar ürünlerin, tüvenan linyitten daha aromatik yapıda olduğunu göstermektedir. Si-O ve C-O gerilmelerinin artmasıyla birlikte, 1035 cm^{-1} pikinin şiddetinde belirgin bir azalma görülmemiştir. Bu pik, yapı içerisindeki silisli ve inorganik maddeleri gösteren banttır. Buradan Elbistan linyitinin zenginleştirmesinin çok da başarılı olamadığı sonucuna varılabilir.

Piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliğini tespit etmek amacıyla, optimum şartlarda deneyler 2 kere daha tekrarlanmıştır. Tekrarlanan piroliz deney sonuçları Çizelge 4.20’de verilmiştir. Çizelge 4.20’ye göre, tekrarlanabilirlik test sonuçları ile optimum piroliz sonuçları çok iyi uyum içerisinde. Bu sonuçlara göre piroliz deneylerinin tekrarlanabilirliklerinin yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 4.20. Elbistan linyitinin piroliz deneylerinin tekrarlanabilirlik testleri

(%)	Çar ürün	Sıvı ürün	Gaz ürün	Kül	Uçucu madde	Sabit C
Tüvenan kömür	66,46	22,80	10,74	56,13	19,77	24,10
Tüvenan kömür 1. Tekrar	66,48	22,83	10,69	56,05	19,68	24,27
Tüvenan kömür 2. Tekrar	66,69	22,74	10,57	55,98	19,82	24,20
Lave kömür*	52,85	25,27	21,88	38,13	16,06	45,81
Lave kömür 1. Tekrar*	52,59	25,11	22,30	38,08	15,98	45,94
Lave kömür 2. Tekrar*	52,67	25,30	22,03	38,19	16,04	45,77

*Beslemeye göre

4.3.8. Sıvılaştırma deneyleri

Elbistan tüvenan linyit ve Reichert spirali lavesinin sıvılaştırma deney sonuçlarından elde edilen ürünlerin kısa analizi Çizelge 4.21' de verilmiştir.

Tetrahidrofuran (THF, C_4H_8O) ile yıkanan katı kalıntı (çar), vakum koşullarında kurutulduktan sonra tartılarak katı kalıntı (çar) verimleri belirlenmiş ve kül içerikleri analiz edilmiştir. Çizelge 4.21'den tüvenan linyitte %17,49 olan sabit karbon miktarına oranla çar ürünlerin karbon miktarlarında önemli bir artış olduğu görülmüştür.

Sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan linyitin katı kalıntısında 7722 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin katı kalıntısında 8626 kcal/kg; tüvenan linyitin preasfalteninde 7305 kcal/kg iken, zenginleştirilmiş linyitin preasfalteninde 7857 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4845 kcal/kg iken zenginleştirilmiş linyitin yağ üründe ise 5220 kcal/kg olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.21. Tüvenan Elbistan linyitinin ve lavenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen ürünlerin kısa ve elementel analiz sonuçları ile ürün verimleri

	Tüvenan Elbistan linyitinin katı kalıntısı	Zenginleştirilmiş Elbistan linyitinin katı kalıntısı
Kısa analizler (%)		
Kül	22,13	15,17
Uçucu madde	24,90	21,31
Sabit karbon*	52,97	63,52
Elementel analiz (%) (kuru-külsüz bazda)		
C	53,13	63,49
H	4,93	4,74
N	1,46	1,21
S	2,35	1,96
O (fark ile)	38,13	28,60
Kalorifik değer (kcal/kg) (kuru-külsüz bazda)		
Katı kalıntı (çar)	7722	8626
Preasfalten	7305	7857
Yağ	4845	5220

Sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları Çizelge 4.22’de verilmiştir. Asfalten örneklerinin cam sistemlerden uzaklaştırmasının verdiği zorluk ve madde miktarının az olmasından dolayı elementel analizleri ve kalorifik değerleri tespit edilememiştir.

Çizelge 4.23’de Elbistan tüvenan linyiti ve zenginleştirilmiş linyitin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen ürünlerin verimleri ve toplam dönüşümleri verilmiştir. Çizelge 4.23’den zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilen ürünlerden çar veriminin neredeyse yarı yarıya düştüğü, buna karşılık preasfalten, asfalten ve yağ+gaz verimlerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Literatürdeki Elbistan linyiti ile yapılan sıvılaştırma çalışmalarında birçok parametre denenerek hesaplanan toplam dönüşüm değerlerinin tez çalışmasında hesaplanan toplam dönüşüm değerlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Yıldız vd., 2016; Bayraktar ve Özkaplan, 1985; Karaca ve Koyunoğlu, 2010a; Karaca ve Koyunoğlu, 2010b)

Çizelge 4.22. Elbistan linyitinin sıvılaştırma işlemi sonrasında elde edilen preasfalten ve yağ örneklerine ait elementel analiz sonuçları

	Tüvenan Elbistan	Zenginleştirilmiş	Tüvenan Elbistan	Zenginleştirilmiş
(%)	linyitinin	Elbistan linyitinin	linyitinin yağı	Elbistan
	preasfaltene	preasfaltene		linyitinin yağı
C	65,15	81,30	71,41	80,12
H	6,03	6,58	6,99	7,06
N	1,16	1,32	0,54	0,42
S	0,98	0,69	0,42	0,29
O*	26,68	10,11	20,64	12,11

* Fark ile

Çizelge 4.23. Elbistan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen çar verimi ve dönüşüm yüzdeleri

(%)	Çar	Preasfalten	Asfalten	Yağ+gaz	Toplam
	verimi				dönüşüm
Elbistan tüvenan çarı	81,72	1,67	1,83	14,78	18,28
Elbistan lave çarı	43,32	11,66	10,00	35,02	56,68

Kömür sıvılaştırılmasının temel amacı yeni bir sıvı yakıt ve kimyasal hammadde üretebilmektir. Hem petrole alternatif bir sıvı yakıt olarak değerlendirilebilmesi, hem de temel kimyasal hammadde üretimi için uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla, sıvılaştırma ürünü olarak elde edilen yağların nicel ve nitel analizleri GC-MS analizi ile yapılmıştır. Tüvenan ve zenginleştirilmiş linyit örneklerine ait GC-MS sonuçları Çizelge 4.24’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.24’den görüldüğü gibi literatüre uygun olarak, Elbistan linyitinin katalitik olmayan koşullarda ve çözücü olarak tetralin kullanılarak sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağların önemli ölçüde, azulen ve türevleri, naftalin ve türevleri, bütillenmiş-hidroksitoluen, indol bileşenlerden oluştuğu belirlenmiştir (Speight, 1994; Methakhup vd., 2007; Karaca ve Koyunoğlu, 2010b). Zenginleştirildikten sonraki kömür sıvısında, tüvenan kömür sıvısında var olmayan herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır. Aksine tüvenan linyitte bulunan naftalin ve binaftalen grupları ortadan kaybolmuştur. Ancak bu bileşiklerin toplamdaki miktarları düşük olduğundan, herhangi bir önem arz etmemektedir.

Buna göre, zenginleştirme işleminin sıvı ürün bileşiminde önemli bir etkisinin olmadığı, buna karşılık preasfalten, asfalten ve yağ+gaz verimlerinde artış olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4.23). Ancak teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğinin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

Çizelge 4.24. Elbistan tüvenan ve zenginleştirilmiş linyitinin katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağ ürününün GC-MS analiz sonuçları

Pik No.	Tutulma süresi (dk)		Muhtemel bileşik adı		Toplamdaki miktar (Bolluk %)	
	Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave	Tüvenan	Lave
A	7,112	7,135	Toluen	Toluen	1,72	1,34
B	25,554	25,520	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	Naftalin, 1,2,3,4-tetrahidro-	59,03	55,19
C	27,539	27,539	Naftalin, 1,2-dihidro-1,4-dihidronaftalin	Naftalin, 1,2-dihidro-1,4-dihidronaftalin	0,78	0,65
D	31,299	31,310	Azulen	Azulen	20,83	28,61
E	37,232	35,636	Naftalin, 2-metil-	Naftalin, 2-metil-	0,94	1,49
F	38,428	38,227	Naftalin, 1-metil-Butilhidroksi tolue	Naftalin, 1-metil-Butilhidroksi tolue	3,59	1,49
G	50,399	62,781	1(2H)-naftalenon, 3,4-dihidro	1H-inden-5-ol, 2,3-dihidro-	0,61	0,67
H	62,787	69,487	2,4 -di metil benzaldehit	18,18'-Bi-1,4,7,10,13,16-hekzaokzasilo nonadesan	0,54	0,54
I	69,493	88,684	1-naftalenol, 2-metil-7-metil-1-naftol	2,2'-Binaftalin, 1,1',2,2',3,3',4,4'-oktahidro-	1,01	1,46
J	82,613		Naftalin-1,4-imin, 1,2,3,4-tetrahidro-9-metil		1,51	
K	88,707		2,2'-binaftalen, 1,1',2,2',3,3',4,4'-oktahidro-		1,53	

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Malatya Arguvan, Sivas Kangal ve Kahramanmaraş Elbistan linyitleri üzerinde yapılan çalışmalar; karakterizasyon, zenginleştirme ve teknolojik ürün elde etme (piroliz ve sıvılaştırma çalışmaları) olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir.

1. Linyitler üzerinde gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları:

- Tüvenan Arguvan linyitinin %80'i 10 mm altı, ortalama tane boyutu 6,1 mm; Kangal linyitinin %80'i 35 mm altı, ortalama tane boyutu 18,1 mm ve Elbistan linyitinin ise %80'i 14 mm altı olup ortalama tane boyutu 7,9 mm'dir. Ortalama tane boyutuna göre tüvenan halde iri boyuttan inceye doğru Kangal>Elbistan>Arguvan linyiti sıralaması belirlenmiştir.
- Dış görünüşüne göre, orijinal nem oranı %22,67 olan Arguvan sert linyit, %45,91 olan Kangal linyiti ve %50,49 olan Elbistan linyiti yumuşak linyit sınıfına girmektedir. ASTM sınıflamasına göre kuru-külsüz bazda üst ısıl değeri 4795 kcal/kg olan Arguvan linyiti Alt Bitümlü-C, 5697 kcal/kg olan Kangal linyiti ve 5322 kcal/kg olan Elbistan linyiti Alt Bitümlü-B linyit sınıfına girmektedir.
- Petrografik analiz sonuçlarına göre; Arguvan linyitinin hacimce %59 vitrinit, %7 eksinit ve %6 inertinit grubundan, mineral madde dağılımının ise %6 framboidal pirit ve %22 diğer mineral maddelerden; Kangal linyitinin hacimce %54 vitrinit, %3 eksinit ve %2 inertinit grubundan, mineral madde dağılımının ise %3 framboidal pirit, %2 idiomorf pirit ve %36 diğer mineral maddelerden; Elbistan linyitinin hacimce %50 vitrinit, %4 eksinit ve %6 inertinit grubundan, mineral madde dağılımının ise %6 framboidal pirit ve %34 diğer mineral maddelerden oluştuğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre vitrinit içeriği sıralaması Arguvan>Elbistan>Kangal linyiti şeklindedir. Bununla beraber vitrinit içerikleri koklaşma için uygun miktarda olsa da, kuru-külsüz bazda uçucu madde miktarları (Elbistan %67,19 UM>Kangal %63,18 UM>Arguvan %47,3 UM) çok yüksek olduğundan dolayı çar ürünün toz halinde çıkması beklenen bir durumdur. Mineral madde sıralaması ise Kangal>Elbistan>Arguvan şeklindedir ve kül içerikleri (Kangal %43,66 kül> Elbistan %39,65 kül> Arguvan %37,77 kül) ile uyumludur.
- Çalışılan her 3 linyit örneği üzerinde gerçekleştirilen termal gravimetri analizlerinde, kaba ve bünye nemine bağlı olan 1.bölge, uçucu madde çıkışına ve sabit karbonun yanmasına bağlı olan 2.bölge ve 3.bölge belirlenmiştir.
- Gerçek yoğunluklara göre hesaplanan Taggart konsantrasyon kriteri değerleri Arguvan linyiti için 2,14, Kangal linyiti için 1,65 ve Elbistan linyiti için ise 1,55 olarak bulunmuştur. Konsantrasyon kriterlerine göre kolaydan zora doğru Arguvan>Kangal>Elbistan linyiti sıralaması bulunmuştur. Arguvan linyiti haricinde Kangal ve Elbistan linyitlerinin gravite

ayırmasının güç olduğu ve dar tane boyutlarında kontrollü olarak yapılabileceği belirlenmiştir.

2. Linyitler üzerinde gerçekleştirilen zenginleştirme çalışmaları:

- Yüzdürme-batırma testlerinden $1,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğundaki $\pm 0,1$ değerlerine göre yıkanabilirlik sırası Arguvan (17,3)>Kangal (23,2)>Elbistan (31,9) linyiti şeklinde belirlenmiştir.

Yüzdürme-batırma deneyleri sonucunda yıkanabilirlik sayısı (W) değerleri Arguvan linyiti için 7,5, Kangal linyiti için 5,6 ve Elbistan linyiti için 6 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler literatürde kolay yüzen kömürlerin değerleriyle karşılaştırıldığında, Arguvan linyitinin orta derecede, Kangal linyitinin oldukça zor ve Elbistan linyitinin ise nispeten çok daha zor yıkanabilir özellikte olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Yakın malzeme yoğunluk indeksi (NGMI) değerlerine göre $1,65 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta yıkanabilirlik Arguvan (0,21)>Kangal (0,30)>Elbistan (0,32) sıralaması; yıkanabilirlik indeksi (IW/GIW) açısından ise Kangal (13,09) $\approx$ Arguvan (12,85)> Elbistan (10,78) sıralaması belirlenmiştir.

- Arguvan linyitinin $1,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta yüzdürülmesiyle, %37,77 kül, %3,85 kükürt içeren ve 2576 kcal/kg kalorifik değere sahip olan linyitten, 3780 kcal/kg kalorifik değere sahip %28,42 kül ve %2,64 kükürt içerikli lave %87,42 yanabilir verim ve %50,57 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Aynı şekilde Kangal linyitinin $1,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta yüzdürülmesiyle, %43,66 kül, %2,94 kükürt içeren ve 2860 kcal/kg kalorifik değere sahip olan linyitten, 3220 kcal/kg kalorifik değere sahip %36,24 kül ve %2,69 kükürt içerikli lave %84,99 yanabilir verim ve %35,20 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Elbistan linyitinin $1,65 \text{ g/cm}^3$ yoğunlukta yüzdürülmesiyle, %39,65 kül, %2,72 kükürt içeren ve 2813 kcal/kg kalorifik değere sahip olan linyitten, 3150 kcal/kg kalorifik değere sahip %35,50 kül ve %2,28 kükürt içerikli lave %84,73 yanabilir verim ve %27,20 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır.
- Optimum sallantılı masa deneyleri sonucunda Arguvan linyitinden 4192 kcal/kg kalorifik değere sahip %26,27 kül ve %2,54 kükürt içerikli lave, %79,63 yanabilir verim ve %46,36 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Kangal linyitinden 3635 kcal/kg kalorifik değere sahip %27,72 kül ve %1,92 kükürt içerikli lave, %79,62 yanabilir verim ve %70,92 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Elbistan linyitinden ise 3300 kcal/kg kalorifik değere sahip %34,34 kül ve %2,26 kükürt içerikli lave, %80,52 yanabilir verim ve %30,65 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Buna göre sallantılı masa ayırımında başarı sıralaması kül için Arguvan>Kangal>Elbistan linyiti şeklindeyken, kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimi açısından ise Kangal>Arguvan>Elbistan linyiti şeklinde belirlenmiştir.

- Reichert spiraliyle ayırım sonucunda Arguvan linyitinden 4180 kcal/kg kalorifik değere sahip %26,51 kül ve %2,08 kükürt içeren lave %77,71 yanabilir verim ve %56,23 kükürt uzaklaştırma verimiyle; Kangal linyitinden 3990 kcal/kg kalorifik değere sahip %20,41 kül ve %1,29 kükürt içeren lave %77,75 yanabilir verim ve %69,79 kükürt uzaklaştırma verimiyle; Elbistan linyitinden ise 4010 kcal/kg kalorifik değere sahip %27,19 kül ve %1,80 kükürt içeren lave %59,47 yanabilir verim ve %56,73 kükürt uzaklaştırma verimiyle kazanılmıştır. Bu sonuçlara göre Reichert spirali ayırım başarısı kül açısından Kangal>Arguvan>Elbistan linyiti, kükürt ve kükürt uzaklaştırma verimi açısından ise Kangal>Elbistan>Arguvan linyiti sıralaması belirlenmiştir.
- Falcon konsantratör deneylerinde her 3 linyitte de hem kül hem de kükürt uzaklaştırma açısından istenen ayırım sağlanamamıştır. Falcon konsantratörü deneylerinde ince kil minerallerinin kömürle birlikte üst akıma hareket ettiği gözlenmiştir. Ayırımın bu nedenle gerçekleşmediği düşünülmüştür. Ancak birçok çalışma şartlarını göz önünde tutarak ayrıntılı çalışmaların yapılmasında fayda bulunduğu sonucuna varılmıştır.
- Her 3 linyit ile de yapılan flotasyon deneylerinin başarısız olduğu belirlenmiştir. Bunun nedenleri arasında, petrografik analizde elde edilen bulgulara göre tüm linyitlerde mineral madde içeriğinin çok ince dağılımlı (sinjenetik) olması, karbominerit miktarının yüksekliği, linyitlerin yüksek oksitlenme durumu, elementel bazda yüksek okijen içeriği, yan kayaç ile yüzey özellik farklılığının olmaması vb. gösterilebilir. Bununla beraber flotasyon veya agglotasyon araştırmalarının ayrıntılı olarak yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Tüm zenginleştirme deneylerinin sonucunda, her 3 linyit için de ayırım başarı sıralaması Reichert spirali>Sallantılı masa>Yüzdürme-batırma>Falcon konsantratör>Flotasyon şeklinde bulunmuştur.
- Zenginleştirme işlemleri, tüvenan linyitin kül ve kükürt içeriğini azaltarak daha kaliteli teknolojik ürün elde edilmesi amacıyla yapılmıştır. Gerçekleştirilen tüm zenginleştirme deneyleri sonucunda Arguvan, Kangal ve Elbistan linyitlerinde, en düşük kül ve kükürt içeriğine sahip laveler Reichert spirali deneylerinden elde edilmiştir. Kaliteli piroliz ve sıvılaştırma ürünü elde edilmesine yönelik araştırmalarda yapılacak deneylerde Reichert spiraline ait laveler kullanılmıştır.

3. Piroliz çalışmaları:

- Tüvenan Arguvan linyiti için optimum piroliz şartları -3,35 mm tane boyutu, 500°C piroliz sıcaklığı, 45 dakika piroliz süresi olarak seçilmiştir. Bu şartlarda yapılan piroliz sonucunda; çar ürün verimi %62,25, sıvı ürün verimi %29,13 ve gaz ürün verimi %8,62 olarak bulunmuştur. 6827 kcal/kg kalorifik değere sahip çar ürünün %53,01 kül, %6,84 uçucu madde, %40,15 sabit karbon ve %3,02 kükürt içerdiği belirlenmiştir. Lave Arguvan linyitinin pirolizi sonucunda, tüvenan ürüne göre çar veriminde %3,45 ve sıvı ürün veriminde %3,97

azalma olurken, gaz ürün verimi ise %7,42 oranında artış göstermiştir. Buna karşılık çarın kül içeriği %53,01'den %31,85'e azalırken, sabit karbon içeriğinin %40,15'den %61,50'ye ve kalorifik değerinin ise 6827 kcal/kg'dan 7699 kcal/kg'a yükseldiği belirlenmiştir. Çar ürünün kısa analizi karşılaştırıldığında zenginleştirmenin faydalı olduğu açıkça görülmektedir. Tüvenan linyit, tüvenan piroliz çarı ve lave piroliz çarının her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,81 %S/1000 kcal, 0,44 %S/1000 kcal ve 0,24 %S/1000 kcal olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç ve kısa analiz sonuçları, pirolizden elde edilen çarın dumansız yakıt olarak kullanılmasını teorik olarak mümkün hale getirmiştir.

Zenginleştirme çalışmalarından Arguvan linyitinin yıkanmasının gerekli olduğu sonucuna varılabilir. Zenginleştirmenin piroliz ürünlerinden çar üzerine olumlu etki yaptığı görülmesine rağmen, sıvı ve gaz ürünlerin kalitesinin ayrıca araştırılması gerekmektedir. Reichert spiral ile ayırmanın ekonomik olduğu düşünülmesine karşılık, ekonomik fizibilite çalışmasının gerekliliği üzerinde araştırmalar yapılmalıdır. Piroliz yöntemi ise teorik olarak mümkün olmasına rağmen günümüz şartlarında ekonomikliği tartışmalıdır.

- Tüvenan Kangal linyiti için optimum piroliz şartları -4,75 mm tane boyutu, 500°C piroliz sıcaklığı, 30 dakika piroliz süresi olarak seçilmiştir. Bu şartlarda yapılan piroliz sonucunda; çar ürün verimi %61,70, sıvı ürün verimi %19,92 ve gaz ürün verimi %18,38 olarak bulunmuştur. 8820 kcal/kg kalorifik değere sahip çar ürünün %58,70 kül, %30,13 sabit karbon ve %2,42 kükürt içerdiği belirlenmiştir. Lave Kangal linyitinin pirolizi sonucunda, tüvenan ürüne göre çar verimi %14,26 azalma, sıvı ürün verimi %11,97 ve gaz ürün verimi %2,29 artış göstermiştir. Buna karşılık çarın kül içeriği %58,70'den %32,18'e azalırken, sabit karbon içeriği %30,13'den %58,53'e ve kalorifik değerinin ise 8820 kcal/kg'dan 9240 kcal/kg'a yükseldiği belirlenmiştir. Tüvenan linyit, tüvenan piroliz çarı ve lave piroliz çarının her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,52 %S/1000 kcal, 0,27 %S/1000 kcal ve 0,10 %S/1000 kcal olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, linyitin yıkanması gerektiğini ve kükürt açısından çevre kirliliğini en aza indirecek yakıtın elde edilebileceğinin teorik olarak mümkün olduğunu göstermiştir.

Zenginleştirme ve piroliz çalışmaları Kangal linyitinden kükürt uzaklaştırmanın başarılı olarak yapılabileceğini göstermiştir. Çar ürünlerin kısa analizi karşılaştırıldığında kül ve kükürt giderimi açısından kömür yıkamanın faydalı olduğu açıkça görülmektedir. Lavenin pirolizi ile elde edilen yaklaşık %32 sıvı ürünün üzerine çalışmalar yapılabileceği önerilmiştir. 3 linyit içerisinde kül, kükürt uzaklaştırma ve piroliz açısından en başarılı linyitin Kangal linyiti olduğu anlaşılmıştır. Ekonomik fizibilite çalışmaları sonucunda, Kangal linyitini Reichert spirali ile yıkamanın uygulamaya geçirilmesinin mümkün olduğu düşünülmüştür.

- Tüvenan Elbistan linyiti için optimum piroliz şartları -4,75 mm tane boyutu, 600°C piroliz sıcaklığı, 30 dakika piroliz süresi olarak seçilmiştir. Bu şartlarda yapılan piroliz sonucunda;

çar ürün verimi %66,97, sıvı ürün verimi %22,11 ve gaz ürün verimi %10,92 olarak bulunmuştur. 7422 kcal/kg kalorifik değere sahip çar ürünün %56,13 kül, %24,10 sabit karbon ve %2,34 kükürt içerdiği belirlenmiştir. Lave Elbistan linyitinin pirolizi sonucunda, tüvenan ürüne göre çar veriminde %13,61 azalma, sıvı ürün veriminde %2,47 ve gaz ürün veriminde %11,14 oranında artış tespit edilmiştir. Buna karşılık çarın kül içeriği %56,13'den %38,13'e azalırken, sabit karbon içeriği %24,10'dan %45,81'e ve kalorifik değeri ise 7422 kcal/kg'dan 7677 kcal/kg'a yükseldiği belirlenmiştir. Tüvenan linyit, tüvenan piroliz çarı ve lave piroliz çarının her 1000 kcal başına düşen kükürt oranları sırasıyla 0,52 %S/1000 kcal, 0,32 %S/1000 kcal ve 0,19 %S/1000 kcal olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, Elbistan linyitinin pirolizinin teknolojik ve ekonomik olarak yeterli kül azaltma ve ısı değeri artışı sağlanamadığından dolayı uygun olmadığını göstermektedir.

Elbistan linyitinin yıkanması gerekliliği belirlenirken, piroliz sonuçlarının istenen özellikleri sağlamadığı anlaşılmıştır. Sadece Elbistan linyitinin lave pirolizinin gaz ürün veriminde bir iyileşme (yaklaşık %11) belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, gravite ayırımları içerisinde en uygun olan Reichert spirali ile ayırımın yeterli olduğu kanaati oluşmuştur.

4. Sıvılaştırma deneyleri sonucu elde edilen katı kalıntı (çar), preasfalten, asfalten ve yağ ürün verimleri belirlenmiş, elementel analizleri, kısa analizleri, GS-MS analizleri yapılmış ve tüvenan linyit ile lave sonuçları karşılaştırılmıştır.
- Arguvan tüvenan linyiti ve lavesi ile yapılan sıvılaştırma deneyleri sonucunda; tüvenan çar verimi %52,43, preasfalten verimi %8,87, asfalten verimi %8,33 iken yağ+gaz verimi %30,37 olarak belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırması sonucunda çar verimi %9,28 azalırken, preasfalten verimi %5,31 ve yağ+gaz verimi %4,18 artmış, asfalten verimi değişmemiştir. Buna göre tüvenan Arguvan linyitinin toplam dönüşüm miktarı %47,57'den lavenin toplam dönüşümü %56,85'e yükselmiştir. Sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan çarında 8175 kcal/kg iken, lavenin çarında 8389 kcal/kg; tüvenan preasfalteninde 8319 kcal/kg iken, lavenin preasfalteninde 8549 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4400 kcal/kg iken lavenin yağ üründe ise 4638 kcal/kg'a yükselmiştir. Arguvan linyitinin sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağların GS-MS analiz sonuçlarına göre, önemli miktarda azulen ve türevleri, naftalin ve türevleri, bütillhidroksitoluen gibi hidrokarbon bileşiklerinden oluştuğu belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırılması sonucu elde edilen yağda tüvenan kömür yağında var olmayan dimetilbenzaldehit ve propandinitril gibi bileşiklere rastlanmıştır. Ancak bu bileşiklerin toplamdaki bollukları çok az olduğundan (yaklaşık %1), zenginleştirme işleminin yağ ürün bileşiminde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlardan, zenginleştirme işleminin sıvılaştırma ürünleri üzerine oldukça olumlu bir etkisinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ancak, teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğinin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

- Kangal tüvenan linyiti ve lavesi ile yapılan sıvılaştırma deneyleri sonucunda; tüvenan çar verimi %68,26, preasfalten verimi %10,62, asfalten verimi %3,33 iken yağ+gaz verimi %17,79 olarak belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırması sonucunda çar verimi %16,5 azalırken, asfalten verimi %1,67 ve yağ+gaz verimi %14,64 artmış, preasfalten verimi ise değişmemiştir. Buna göre tüvenan Kangal linyitinin toplam dönüşüm miktarı %31,74'den lavenin toplam dönüşümü %48,24'e yükselmiştir. Sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan çarında 6903 kcal/kg iken, lavenin çarında 7083 kcal/kg; tüvenan preasfalteninde 7817 kcal/kg iken, lavenin preasfalteninde 7961 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4374 kcal/kg iken lavenin yağ üründe ise 4991 kcal/kg'a yükselmiştir. Kangal linyitinin sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağların GS-MS analiz sonuçlarına göre, önemli miktarda azulen ve türevleri, naftalin ve türevleri, bütildihidroksitoluen gibi hidrokarbon bileşiklerinden oluştuğu belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırılması sonucu elde edilen yağda tüvenan kömür yağında var olmayan herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır.

Bu sonuçlardan, zenginleştirme işleminin sıvılaştırma ürünlerinden yağ+gaz verimi üzerine oldukça olumlu bir etkisinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ancak, teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğinin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

- Elbistan tüvenan linyiti ve lavesi ile yapılan sıvılaştırma deneyleri sonucunda; tüvenan çar verimi %81,72, preasfalten verimi %1,67, asfalten verimi %1,83 iken yağ+gaz verimi %14,78 olarak belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırması sonucunda çar verimi %38,4 azalırken, preasfalten verimi %9,99, asfalten verimi %8,17 ve yağ+gaz verimi ise %20,24 artmıştır. Buna göre tüvenan Elbistan linyitinin toplam dönüşüm miktarı %18,28'den lavenin toplam dönüşümü %56,68'e yükselmiştir. Sıvılaştırma ürünlerine ait kalorifik değerler tüvenan çarında 7722 kcal/kg iken, lavenin çarında 8626 kcal/kg; tüvenan preasfalteninde 7305 kcal/kg iken, lavenin preasfalteninde 7857 kcal/kg; tüvenan linyite ait yağ üründe 4845 kcal/kg iken lavenin yağ üründe ise 5220 kcal/kg'a yükselmiştir. Elbistan linyitinin sıvılaştırılması sonucunda elde edilen yağların GS-MS analiz sonuçlarına göre, önemli miktarda azulen ve türevleri, naftalin ve türevleri, bütildihidroksitoluen, indol gibi hidrokarbon bileşiklerinden oluştuğu belirlenmiştir. Lavenin sıvılaştırılması sonucu elde edilen yağda tüvenan kömür yağında var olmayan herhangi bir bileşiğe rastlanmamıştır. Aksine tüvenan linyitte bulunan naftalin ve binaftalen gruplarının kayb olduğu gözlenmiştir. Ancak bu bileşiklerin toplamdaki bollukları çok az olduğundan (yaklaşık %1,5), zenginleştirme işleminin yağ ürün bileşiminde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlardan, zenginleştirme işleminin sıvılaştırma ürünlerinin verimlerinin tamamına oldukça olumlu bir etkisinin olduğu görülmüştür. Elbistan linyitinin yıkama yapılmadan sıvılaştırılmasının doğru olmadığı fikri ortaya çıkarılmıştır. Aynı şekilde teorik olarak mümkün olan sıvılaştırma yönteminin ekonomikliğinin araştırılmasının gerekli olduğu açıktır.

KAYNAKLAR

- Abakay Temel, H., Majumder, A.K. (2016). Investigation of the effectiveness of desliming and flotation in cleaning Malatya-Arguvan lignite. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 38, 1048-1054.
- Abakay Temel, H., Majumder, A.K., Bakır, Y. (2015). An assessment of Malatya-Arguvan lignite and Southeastern Anatolia region lignites (Turkey). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 37, 1202-1209.
- Altun, N.E., Hiçyılmaz, C. (2002). Alpagut-Dodurga atık kömürlerinin değerlendirilmesi (syf:113-123). *Türkiye 13. Kömür Kongresi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 29-31 Mayıs, Zonguldak.
- Altun, N.E., Hiçyılmaz, C., Kök, M.V. (2003). Effect of particle size and heating rate on the pyrolysis of Silopi asphaltite. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 67, 369-379.
- Asmatülü, R., Acarkan, N., Önal, G. (1996). Linyit kömürlerinin ısıtma işlemleriyle iyileştirilmesi. *Madencilik* 35, 103-110.
- Asmatülü, R., İpekoğlu, B. (1995). Kömürlerdeki kükürdün kademeli olarak uzaklaştırılması. *İstanbul Üniv.Müh.Fak. Yerbilimleri Dergisi* 9, 85-87.
- Atak, S. (1990). *Flotasyon İlkeleri ve Uygulamaları*. İTÜ Vakfı Yayınları No.34, İstanbul, Türkiye, 222 s.
- Ateşok, G. (2009a). *Kömür Hazırlama ve Teknolojisi*. Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, Karaktercolor A.Ş., İstanbul, Türkiye, 390 s.
- Ateşok, G. (2009b). *Kömür Kullanımı ve Temiz Kömür Teknolojileri*. Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, Karaktercolor A.Ş., İstanbul, Türkiye, 333 s.
- Ayhan, F.D., Abakay Temel, H. (2008). Eskişehir-Mihalıççık linyitinin yıkanabilme özelliklerinin araştırılması. *Madencilik* 47, 35-42.
- Balat, M. (2007). Status of fossil energy resources: a global perspective. *Energy Sources, Part B* 2, 31-47.
- Balat, M. (2008a). Turkey's major lignite fields and significance of lignite for energy necessity. *Energy Sources, Part B* 3, 13-25.
- Balat, M. (2008b). Energy consumption and economic growth in Turkey during the past two decades. *Energy Policy* 36, 118-127.
- Ballice, L. (2002). Classification of volatile products evolved from temperature-programmed pyrolysis of Soma-lignite and Şırnak-asphaltite from Turkey. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63, 267-281.
- Baruah, B.P., Khare, P. (2007). Pyrolysis of high sulfur Indian coals. *Energy and Fuels* 21, 3346-3352.
- Bayraktar, K.N., Özkaplan, O. (1985). Türkiye linyitlerinin sınıflandırılma özellikleri. *MTA Yayınları* 91, 103-116.
- Bentli, İ., Şahin, H., Çınar, M., Horasan, Ü. (2010). Tunçbilek linyit kömürlerinden dumansız yakıt üretimi ön araştırması (syf:79-85). *Türkiye 17. Kömür Kongresi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 2-4 Haziran, Zonguldak.

- Birinci, M. (2013). Determination of washability characteristics of Parcikan (Malatya) lignite (pp:189-192). *Proceedings of the 17th International Coal Preparation Congress*, October 1-6, İstanbul.
- Boylu, F. (2013). Modeling of free and hindered settling conditions for fine coal beneficiation through a Falcon concentrator. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 33, 277-289.
- Boylu, F. (2014). Autogenous medium fine coal washing through Falcon concentrator. *Separation Science and Technology* 49, 627-633.
- Can, M.F., Özgen, S., Sabah, E. (2010). A study to recover coal from Turkish lignite fine coal tailings: comparison of Falcon concentrator and multi gravity separator (pp:1897-1912). *International Pittsburgh Coal Conference*, October 11-14, İstanbul.
- Canel, M., Mısırlıoğlu, Z., Sinağ, A. (2004). Influence of experimental conditions on product distribution during pyrolysis of Tunçbilek lignite (Turkey) at low heating rates. *Energy Sources* 26, 1265-1276.
- Ceylan, K. (1991). Low temperature carbonization of Elbistan lignite. *Chimica Acta Turcica* 19, 197-205.
- Ceylan, K., Karaca, H., Önal, Y. (1999). Thermogravimetric analysis of pretreated Turkish lignites. *Fuel* 78, 1109-1116.
- Ceylan, K., Küçük, M.Z. (2004). Effectiveness of the dense medium and the froth flotation methods in cleaning some Turkish lignites. *Energy Conversion and Management* 45, 1407-1418.
- Cicioğlu Sütçü, E., Karayığit, A.İ. (2015). Mineral matter, major and trace element content of the Afşin-Elbistan coals, Kahramanmaraş, Turkey. *International Journal of Coal Geology* 144-145, 111-129.
- Çakal, G.Ö., Yücel, H., Güniz Gürüz, A. (2007). Physical and chemical properties of selected Turkish lignites and their pyrolysis and gasification rates determined by thermogravimetric analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 80, 262-268.
- Çelebi, N. (2009). Kolloidler (syf:263-275). *Modern Farmasötik Teknoloji*. 14. Bölüm, TEB Eczacılık Akademisi, Ankara.
- Çelik, M.S. (2002). Dry cleaning of low-rank coals by low temperature carbonization and magnetic separation. *Coal Preparation* 22, 311-322.
- Dehghan, R., Aghaei, M. (2013). Evaluation of the validities of NGMI and GWI for the prediction of the performance of industrial Tri-Flo sapersators. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 33, 205-217.
- Demirbaş, M.F. (2007). Progress of fossil fuel science. *Energy Sources, Part B* 2, 243-257.
- Diñer, H., Önal, G., Ateşok, G. (1990). The investigation of the physical upgrading possibilities of the Afşin-Elbistan lignites (pp:251-263). *Proc. 3rd. International Mineral Processing Symposium*, İstanbul Technical Universty, September 11-13, İstanbul.
- Diñer, S., Bolat, E., Öner, M. (1989). *Türk linyitlerinin sıvılaştırılmasında çeşitli deneysel parametrelerin incelenmesi*. Proje no: MAG-717, TÜBİTAK, Ankara.

- Dinçer, S., Bolat, E., Öner, M. (1998). Kömürün sıvılaştırılması (syf:511-531). Kural, O.(Ed.), *Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*. 29.Bölüm, Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş. İstanbul.
- Dryzmala, J. (2007). *Mineral Processing, Foundations of Theory and Practice of Minerallurgy*. Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, 507 s.
- Ediger, V.Ş., Berk, I., Kösebalaban, A. (2014). Lignite resources of Turkey: geology, reserves and exploration history. *International Journal of Coal Geology* 132, 13-22.
- Ekinçi, E., Yardim, F., Razvigorova, M., Minkova, V., Goranova, M., Petrov, N., Budinova, T. (2002). Characterization of liquid products from pyrolysis of subbituminous coals. *Fuel Processing Technology* 77-78, 309-315.
- Elbeyli, İ.Y., Pişkin, S. (2006). Combustion and pyrolysis characteristics of Tunçbilek lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 83, 721-726.
- Erdem, A., Gülmez, A., Altun, O., Toprak, S. (2009). *Lavvar atıklarının değerlendirilmesi ve tesis uygulamaları*. Proje no:106G056, TÜBİTAK, Ankara.
- Falconer, A. (2003). Gravity separation: Old technique/New methods. *Physical Separation in Science and Engineering* 12, 31-48.
- Feng, J., Li, W-Y., Xie, K-C. (2006). Thermal decomposition behaviors of lignite by pyrolysis-FTIR. *Energy Sources, Part A* 28, 167-175.
- Govindarajan, B., Rao, T.C. (1994). Indexing the washability characteristics of coal. *International Journal of Mineral Processing* 42, 285-293.
- Gözmen, B., Artok, L., Erbatur, G., Erbatur, O. (2002). Direct liquefaction of high-sulfur coals: effects of the catalyst, the solvent and the mineral matter. *Energy and Fuels* 16, 1040-1047.
- Gupta, R. (2007). Advanced coal characterization: a review. *Energy and Fuels* 21, 451-460.
- Gül, Ö., Gafarova, P., Hesenov, A., Schobert, H.H., Erbatur, O. (2004). Catalytic direct liquefaction of high sulfur lignites: temperature and solvent effect on product distributions. *Prepr.Pap.-Am.Chem.Soc., Div.Fuel Chem.* 49(2), 559-561.
- Güldoğan, Y., Durusoy, T., Bozdemir, T. (2001b). Pyrolysis kinetics of blends of Mengen lignite with Denizli peat. *Energy Sources* 23, 657-663.
- Güldoğan, Y., Durusoy, T., Bozdemir, T. (2002). Effects of heating rate and particle size on pyrolysis kinetics of Gediz lignite. *Energy Sources* 24, 753-760.
- Güldoğan, Y., Evren, V., Durusoy, T., Bozdemir, T. (2001a). Effects of heating rate and particle size on pyrolysis kinetics of Mengen lignite. *Energy Sources* 23, 337-344.
- Güldoğan, Y., Özbaş Bozdemir, T., Durusoy, T. (2000). Effect of heating rate on pyrolysis kinetics of Tunçbilek lignite. *Energy Sources* 22, 305-312.
- Hayashi, J., Takahashi, H., Doi, S., Kumagai, H., Chiba, T., Yoshida, T., Tsutsumi, A. (2000). Reactions in Brown coal pyrolysis responsible for heating rate effect on tar yield. *Energy and Fuels* 14, 400-408.
- Haykırı-Açma, H., Yaman, S., Küçükbayrak, S. (2012). Effect of pyrolysis temperature on burning reactivity of lignite char. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research* 29(2), 1203-1216.

- He, Q., Wan, K., Hoadley, A., Yeasmin, H., Miao, Z. (2015). TG-GC-MS study of volatile products from Shengli lignite pyrolysis. *Fuel* 156, 121-128.
- Hepbaşlı, A. (2004). Coal as an energy source in Turkey. *Energy Sources* 26, 55-63.
- Hesenov, A., Gül, Ö., Gafarova, P., Erbatur, O., Schobert, H.H. (2004). Distribution of main product fractions in co-liquefaction of high-sulfur lignites blended with petroleum heavy bottoms. *Prepr.Pap.-Am.Chem.Soc., Div.Fuel Chem.* 49(2), 500-502.
- Holuszko, M.E., Grieve, D.A. (1990). Washability characteristics of British Columbia coals. *British Columbia Geological Survey* 1, 371-379.
- Honaker, R.Q. (1998). High capacity fine coal cleaning using an enhanced gravity concentrator. *Minerals Engineering* 11, 1191-1199.
- Honaker, R.Q., Singh, N., Govindarajan, B. (2000). Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning. *Minerals Engineering* 13, 415-427.
- Honaker, R.Q., Wang, D., Ho, K. (1996). Application of the Falcon concentrator for fine coal cleaning. *Minerals Engineering* 11, 1143-1156.
- İbrahim, S.S., Anadoly, B.E., Farahat, M.M., Selim, A.Q., Menshaw, A.H. (2014). Separation of pyritic sulfur from Egyptian coal using Falcon concentrator. *Particulate Science and Technology* 32, 588-594.
- Jan, N., Niamat, U., Ahmad, A.I., Khalid, K., Imtiaz, A. (2011). Characterization of the products obtained in coal pyrolysis: a case study of some Pakistani coals. *Iran. J. Chem. Eng.* 30, 53-56.
- Jayaraman, K., Bonifaci, E., Merlo, N., Gökalp, I. (2013). High ash Indian and Turkish coal pyrolysis and gasification studies in various ambiances (pp:813-823). *8th Mediterranean Combustion Symposium*, September 8-13, İzmir.
- Kanca, A., Dodd, M., Reimer, J.A., Uner, D. (2016). Following the structure and reactivity of Tunçbilek lignite during pyrolysis and hydrogenation. *Fuel Processing Technology* 152, 266-273.
- Karaca, H., Koyunuoğlu, C. (2010a). Co-liquefaction of Elbistan lignite and biomass. Part I: The effect of the process parameters on the conversion of liquefaction products. *Energy Sources, Part A* 32, 495-511.
- Karaca, H., Koyunuoğlu, C. (2010b). The co-liquefaction of Elbistan lignite and biomass. Part II: The characterization of liquefaction products. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 32, 1167-1175.
- Karayığit, A.İ., Gayer, R.A. (2000). Trace elements in a Pliocene-Pleistocene lignite profile from Afşin-Elbistan field, Eastern Turkey. *Energy Sources* 22, 13-21.
- Karayığit, A.İ., Gayer, R.A., Ortac, F.E., Goldsmith, S. (2001). Trace elements in the Lower Pliocene fossiliferous Kangal lignites, Sivas, Turkey. *International Journal of Coal Geology* 47, 73-89.
- Karayığit, A.İ., Gayer, R.A., Querol, X., Onacak, T. (2000). Contents of major and trace elements in feed coals from Turkish coal-fired power plants. *International Journal of Coal Geology* 44, 169-184.
- Kawatra, S.K., Eisele, T.C. (2001). *Coal Desulfurization High-Efficiency Preparation Methods*. Development of Mining and Materials Processing Engineering Michigan Technological University, Taylor and Francis Inc. Michigan, USA, 359 s.

- Kemal, M., Arslan, V. (2010). *Kömür Teknolojisi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.33, İzmir, Türkiye, 394 s.
- Kemal, M., Semerkant, O. (1988). Türkiye linyit potansiyeli ve kullanım olanağı. *Madencilik* 27, 17-31.
- Kizgut, S., Baran, Y., Çuhadaroğlu, D. (2003). Reactivity and characterisation of various rank Turkish bituminous coal chars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 71, 857-865.
- Kök, M.V., Hiçyılmaz, C., Özbaş, K.E. (2001). Effect of cleaning process on the combustion characteristics of two different rank coals. *Energy and Fuels* 15, 1461-1468.
- Kök, M.V., Özbaş, E., Karacan, Ö., Hiçyılmaz, C. (1998). Effect of particle size on coal pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 45, 103-110.
- Köksoy, M. (1985). *Yakıtlar Jeolojisi*. Hacettepe Üniversitesi Yayınları A54, Ankara, Türkiye, 207 s.
- Kural, O. (1994). *Coal Resources, Properties, Utilization, Pollution*. Ozgun A.Ş., Turkey, 494 s.
- Kural, O. (1998). *Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*. Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, Türkiye, 785 s.
- Kurumuş, İ., Yıldırım, M. (2004). Afşin/Elbistan linyitlerindeki külün azaltılması (syf:141-148). *Türkiye 14. Kömür Kongresi*, 2-4 Haziran, Zonguldak.
- Laskowski, J.S. (2001). *Coal Flotation and Fine Coal Utilization*. Elsevier Academic Press, Canada, 368 s.
- Laskowski, J.S., Ralston, J. (1992). *Colloid Chemistry in Mineral Processing*. Elsevier Academic Press, Netherlands, 428 s.
- Lee, S-J., Cho, H-C., Kwon, J-H. (2012). Beneficiation of coal pond ash by physical separation techniques. *Journal of Environmental Management* 104, 77-84.
- Leonard, J.W., Hardinge, B.C. (1991). *Coal Preparation (5th Edition)*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado, USA, 1131 s.
- Li, J., Yang, J., Liu, Z. (2009). Hydrogenation of heavy liquids from a direct coal liquefaction residue for improved oil yield. *Fuel Processing Technology* 90, 490-495.
- Li, X., Xue, Y., Feng, J., Yi, Q., Li, W., Guo, X., Liu, K. (2015). Co-pyrolysis of lignite and Shendong coal direct liquefaction residue. *Fuel* 144, 342-348.
- Lievens, C., Ci, D., Bai, Y., Ma, L., Zhang, R., Chen, Y.J., Gai, Q., Long, Y., Guo, X. (2013). A study of slow pyrolysis of one low rank coal via pyrolysis-GC/MS. *Fuel Processing Technology* 116, 85-93.
- Majumder, A.K., Barnwal, J.P. (2004). Development of a new coal washability index. *Minerals Engineering* 17, 93-96.
- Majumder, A.K., Barnwal, J.P. (2006). Modeling of enhanced gravity concentrators-present status. *Mineral Processing and Extractive Metall. Rev.* 27, 61-86.
- Meng, F., Yu, J., Tahmasebi, A., Han, Y., Zhao, H., Lucas, J., Wall, T. (2013). Characteristics of chars from low-temperature pyrolysis of lignite. *Energy Fuels* 28, 275-284.

- Methakhup, S., Ngamprasertsith, S., Prasassarakich, P. (2007). Improvement of oil yield and its distribution from coal extraction using sulfide catalysts. *Fuel* 86, 2485-2490.
- Miller, B.G. (2005). *Coal Energy Systems*. Elsevier Academic Press, San Diego, USA, 526 s.
- Miller, B.G., Tillman, D.A. (2008). *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*. Elsevier Academic Press, San Diego, USA, 496 s.
- Mir, F. (2014). Washability characteristic of low volatile Pakistani coking coal by crushing. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2, 502-506.
- Mo, C., Shifeng, Z., Yanyan, Y., Yunpeng'a, D. (2012). Characteristics of pyrolysis products of Bori lignite briquette. *Energy Procedia* 16, 307-313.
- Mohanta, S., Sahoo, B., Behera, I.D., Pradhan, S. (2016). Effect of crushing on near-gravity material distribution in different size fractions of an Indian non-coking coal. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 95, 209-213.
- Nasir, S., Kucerik, J., Mahmood, Z. (2012). A study on the washability of the Azad Kashmir (Pakistan) coalfield. *Fuel Processing Technology* 99, 75-81.
- Ocakoğlu, F. (2015). *Kömür Jeolojisi Ders Notları*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 63 s.
- Onay, Ö., Tunçbilek, E., Öz Aksoy, D. (2015). Upgrading of lignites by fast pyrolysis and high density dry magnetic separation. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering* 1, 53-61.
- Oruç, F., Özgen, S., Sabah, E. (2010). An enhanced-gravity method to recover ultra-fine coal from tailings: Falcon concentrator. *Fuel* 89, 2433-2437.
- Önal, G., Mustafaev, I., Yıldırım, İ., Çelik, M.S. (1995). Linyitlerin ısı ile zenginleştirilmesinin ekonomik analizi (syf:467-472). *Türkiye 14. Madencilik Kongresi*, 6-9 Haziran, Ankara.
- Önal, G. (1980). *Cevher Hazırlamada Flotasyon Dışındaki Zenginleştirme Yöntemleri*. İTÜ Yayınları, Sayı 1156, İstanbul, Türkiye, 232 s.
- Öney, Ö., Tanrıverdi, M., Çiçek, T. (2014). Zonguldak ince kömürlerinin spiral ayırıcı ile zenginleştirilmesi (syf:217-225). *Türkiye 19. Kömür Kongresi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, 21-23 Mayıs, Zonguldak.
- Özbayoğlu, G., Arslan, V. (2013). Status of coal: Turkey (pp:41-44). *Proceedings of the 17th International Coal Preparation Congress*, October 1-6, İstanbul.
- Özbayoğlu, G., Depci, T., Ataman, N. (2009). Effect of microwave radiation on coal flotation. *Energy Sources, Part A* 31, 492-499.
- Özdoğan, S., Karaosmanoğlu, F. (1998). Kömürün pirolizi (syf:497-509). Kural, O.(Ed.), *Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*. 28.Bölüm, Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş. İstanbul.
- Parekh, B.K., Miller, J.D. (1999). *Advances in Flotation Technology*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Colorado, USA, 467 s.
- Peker Say, N. (2006). Lignite-fired thermal power plants and SO₂ pollution in Turkey. *Energy Policy* 34, 2690-2701.

- Rahman, M., Adesanwo, T., Gupta, R., Klerk, A. (2015). Effect of direct coal liquefaction conditions on coal liquid quality. *Energy Fuels* 29, 3649-3657.
- Sakintuna, B., Yürüm, Y. (2004). Evolution of carbon microstructures during the pyrolysis of Turkish Elbistan lignite in the temperature range 700-1000°C. *Energy and Fuels* 18, 883-888.
- Sarıkaya, M., Karakuş, M., Kumral, M. (1995). The washability characteristics of Malatya (Arguvan-Çobandere) lignite (pp:657-663). *International Conference on Mineral Processing: Recent Advances and Future Trends*, December 11-15, New Delhi.
- Saydut, A., Duz, M.Z., Erdoğan, S., Hamamcı, C. (2010). The characterization of liquid product via flash pyrolysis of coal (Hazro, SE Anatolia, Turkey). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 32, 1821-1828.
- Schobert, H.H., Song, C. (2002). Chemicals and materials from coal in the 21st century. *Fuel* 81, 15-32.
- Sekhar, S.C., Sarkar, B., Das, A., Chatteraj, U.S., Kumar, V., Rao, K.V., Bhattacharyya, K.K. (2007). Analysis of the washability characteristics of low-volatile Indian coking coal with crushing at different top sizes- a case study. *Advanced Gravity Separation* 83, 188-194.
- Sert, M., Ballice, L., Yüksel, M., Sağlam, M. (2011). Effect of demineralization on product yield and composition at isothermal pyrolysis of Eynez lignites. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50, 10400-10406.
- Sert, M., Ballice, L., Yüksel, M., Sağlam, M. (2014). Soma (Eynez) linyitin mineral yapısının piroliz işlemindeki ürün verimi ve bileşimi üzerine etkilerinin araştırılması (syf:75-85). *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi ukmk11*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2-5 Eylül, Eskişehir.
- Shi, L., Liu, Q., Guo, X., Wu, W., Liu, Z. (2013). Pyrolysis behavior and bonding information of coal-a TGA study. *Fuel Processing Technology* 108, 125-132.
- Shi, Y., Li, S., Hu, H. (2012). Studies on pyrolysis characteristic of lignite and properties of its pyrolysates. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 95, 75-78.
- Shui, H., Cai, Z., Xu, C. (2010). Recent advances in direct coal liquefaction. *Energies* 3, 155-170.
- Sinağ, A. (2004). The influence of pyrolysis conditions on the reactivity of Soma-Işıklar lignite (Turkey). *Energy Sources* 26, 127-134.
- Sivrikaya, O. (2014). Cleaning study of a low-rank lignite with DMS, Reichert spiral and flotation. *Fuel* 119, 252-258.
- Speight, J.G. (1994). *The Chemistry and Technology of Coal (2nd Edition)*. Marcel Dekker Inc., New York, USA, 334 s.
- Speight, J.G. (2005). *Handbook of Coal Analysis*. Wiley-Interscience, USA, 222 s.
- Suarez-Ruiz, I., Ward, C.R. (2008). *Applied Coal Petrology*. Elsevier Academic Press, San Diego, USA, 388 s.
- Sütçü, E., Karayığit, A.İ. (2009). Depositional environment and coal petrology of Afşin-Elbistan coals, Turkey. *Geolines* 22, 73-85.
- Sychkov, P.A., Jirnov, B.S., Khajbullin, A.A. (2009). Not fuel using of brown coal. *Oil and Gas Business*, 1-10.

- Şensöğüt, C., Özşen, H., Demirbaş, A. (2008). Combustion characteristics of 24 lignite samples. *Energy Sources, Part A* 30, 420-428.
- Tao, Y., Luo, Z., Zhao, Y., Tao, D. (2006). Experimental research on desulfurization of fine coal using an enhanced centrifugal gravity separator. *J.China Univ.of Mining and Tech.* 16, 399-403.
- Tekeş, A.T., Sinağ, A., Mısırlıoğlu, Z., Canel, M. (2002). Determination of swelling properties of Soma-Işıklar lignite (Turkey). *Energy and Fuels* 16, 1309-1313.
- Temel, H.A., Bozkurt, V., Ayhan, F.D. (2010). Desulfurization and deashing of Adıyaman-Gölbaşı lignite by flotation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 32, 727-743.
- Thomas, L. (2013). *Coal Geology (2nd. Edition)*. Wiley-Blackwell Publication, Chichester, UK, 442 s.
- Toprak, S., Yalçın Erik, N. (2011). Petrographical properties and unusual features of Kangal coals, Sivas-Turkey. *International Journal of Coal Geology* 86, 297-305.
- Uzun, D., Özdoğan, S. (2006). Sulfur removal from original and acid treated lignites by pyrolysis. *Fuel* 85, 315-322.
- Uzun, D., Özdoğan, S. (2011). Combustion characteristics of the original and demineralized Afşin-Elbistan lignite and its char. *Energy Sources, Part A* 33, 283-297.
- Ünalın, G. (2010). *Kömür Jeolojisi*. MTA Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi-41, Ankara, Türkiye, 556 s.
- Ünlü, M. (1990). The washability characteristics and washing possibilities of Turkish lignites (pp:274-286). *Proc. 3rd. International Mineral Processing Symposium*, İstanbul Technical University, September 11-13, İstanbul.
- Van Krevelen, D.W. (1993). *Coal Typology-Physics-Chemistry Constitution (3rd Edition)*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Hollanda, 431 s.
- Wang, A., Tang, Y., Schobert, H.H., Guo, Y., Su, Y. (2013). Petrology and structural studies in liquefaction reactions of Late Permian coals from Southern China. *Fuel* 107, 518-524.
- Wang, L.K., Shammas, N.K., Selke, W.A., Aulenbach, D.B. (2010). *Flotation Technology*. Humana Press, London, Britain, 680 s.
- Wei, Q., Qiang, X., Yuyi, H., Jiatao, D., Kaidi, S., Qian, Y., Jincan, W. (2012). Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. *International Journal of Mining Science and Technology* 22, 645-650.
- Wills, B.A. (1988). *Mineral Processing Technology (4th Edition)*. Pergamon Press, New York, USA, 584 s.
- www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf (on-line access on 11 Feb, 2017).
- www.enerji.gov.tr/tr-TR/sayfalar/komur
- Xia, W., Xie, G., Peng, Y. (2015). Recent advances in beneficiation for low rank coals. *Powder Technology* 277, 206-221.
- Xu, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, G., Chen, L. (2013). Gas evolution characteristics of lignite during low-temperature pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 104, 625-631.

Yalçın Erik, N. (2010). Kömürleşme süreci ve paleoortam özelliklerinin belirlenmesinde biyomarker verilerinin kullanımı-Kangal kömürleri (Sivas, Türkiye). *İstanbul Yerbilimleri Dergisi* 23, 19-37.

Yıldız, N. (2014). *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme I. Cilt*. Ertem Basım, Ankara, Türkiye, 720 S.

Yıldız, Z., Koyunoğlu, C., Karaca, H. (2006). Elbistan linyiti ve biyokütlenin birlikte katalitik ve katalitik olmayan koşullarda sıvılaştırılması (syf: 1-6). 7. *Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 5-8 Eylül, Eskişehir.

Yılmaz, A.O. (2008). Renewable energy and coal use in Turkey. *Renewable Energy* 33, 950-959.

Zhang, B., Yang, F., Akbari, H., Mohanty M.K., Brodzik, P., Latta, P., Hirschi, J.C. (2011). Evaluation of a new fine coal cleaning circuit consisting of a stack sizer and a Falcon enhanced gravity concentrator. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 31, 78-95.

Zhang, D. (2005). Thermal decomposition of coal. *Encyclopedia of Life Supp. Systems*, 261-267.

Zhang, Q., Tian, Y., Qui, Y., Cao, J., Xiao, T. (2011). Study on the washability of the Kaitai coal, Guizhou Province China. *Fuel Processing Technology* 92, 692-698.

Zhang, W., Jiang, S., Wang, K., Wang, L., Xu, Y., Wu, Z., Shao, H., Wang, Y., Miao, M. (2015). Thermogravimetric Dynamics and FTIR analysis on oxidation properties of low-rank coal at low and moderate temperatures. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 35, 39-50.

EKLER

EK 1. Kömürün Kısa Analiz Hesaplamaları

Nem analizi için yaklaşık 3 g örnek alınarak Nüve FN 500 marka etüvde, 105°C’de 2 saat bekletilmiş ve uğramış olduğu ağırlık kaybından nem içeriği aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\% Nem = \left(\frac{(A - B)}{A} \right) \times 100$$

A= Örneğin ağırlığı (g)

B= Etüvden çıkmış örneğin ağırlığı (g)

Kömür örneklerinin kül analizleri için yaklaşık 1 g örnek, yavaş yavaş 700-750°C’ye çıkarılan Nüve MF 120 marka kül fırınında ısıtılarak, ağırlık sabit kalana kadar (± 0.001 g) bekletilmiştir. Kül miktarı, kalan kütlenin tartılması sonucu aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

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

A= Fırından çıkan kül dolu kroze ağırlığı (g)

B= Boş kroze ağırlığı (g)

C= Örnek ağırlığı (g)

Kömür örneklerinin uçucu madde analizleri için yaklaşık 1 g örnek, kapaklı bir kroze içinde, kül fırınında 950 $\pm$ 20°C’de 7dakika tutulduktan sonra ağırlık kaybı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$C = \left(\frac{(A - B)}{A} \right) \times 100$$

C= % Ağırlık kaybı

A= Fırına girmeden önceki örnek ağırlığı (g)

B= Fırından çıktıktan sonraki örnek ağırlığı (g)

% Uçucu madde = C-D

D= Nem (%)

Sabit C değeri; nem, kül ve uçucu madde yüzdeleri toplamının 100’den çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Sabit C = 100 – (Nem + Kül + Uçucu madde)

Baz dönüşümleri için;

$$N_o = N_{ka} + \frac{(100 - N_{ka})N_h}{100}$$

$$K_k = K_o \frac{100}{(100 - N_o)} = K_h \frac{100}{(100 - N_h)}$$

$$U_s = U_o \frac{100}{(100 - N_o - K_o)} = U_h \frac{100}{(100 - N_h - K_h)} = U_k \frac{100}{(100 - N_k - K_k)}$$

$$S_k = S_o \frac{100}{(100 - N_o)} = S_h \frac{100}{(100 - N_h)}$$

$$H_{\ddot{u}x} = H_{\ddot{u}s} \frac{(100 - N_x - K_x)}{100}$$

$$H_{as} = H_{\ddot{u}s} - 5,95(9H)$$

$$H_{ax} = H_{\ddot{u}x} - 5,95 \left(9H \frac{(100 - N_x - K_x)}{100} + N_x \right)$$

$$H_{ax} = H_{as} \frac{(100 - N_x - K_x)}{100} - 5,95N_x$$

N_o = Orijinal bazda nem (%)

N_{ka} = Kaba nem (%)

N_h = Havada kuru bazda nem (%)

N_x = Herhangi bir bazdaki nem (%)

K_k = Kuru bazda kül (%)

K_o = Orijinal bazda kül (%)

K_h = Havada kuru bazda kül (%)

K_x = Herhangi bir bazdaki kül (%)

U_s = Saf kömür bazında uçucu madde (%)

U_o = Orijinal bazda uçucu madde (%)

U_h = Havada kuru bazda uçucu madde (%)

U_k = Kuru bazda uçucu madde (%)

S_k = Kuru bazda kükürt (%)

S_o = Orijinal bazda kükürt (%)

S_h = Havada kuru bazda kükürt (%)

$H_{\ddot{u}k}$ = Kuru bazda üst ısı değeri (kcal/kg)

$H_{\ddot{u}s}$ = Saf kömür bazında üst ısı değeri (kcal/kg)

H_{as} = Saf kömür bazında alt ısı değeri (kcal/kg)

H_{ak} = Kuru bazda alt ısı değeri (kcal/kg)

$H_{\ddot{u}x}$ = Herhangi bir bazdaki üst ısı değeri (kcal/kg)

H_{ax} = Herhangi bir bazdaki alt ısı değeri (kcal/kg)

EK 2. Elek Analizleri

Ek Çizelge 2.1. Arguvan linyitine ait elek analizi sonuçları

Tane iriliği (mm)	Ağırlık		Kümülatif elek üstü	Kümülatif elek altı	Normal dağılım oranı
	(g)	(%)			
- 38.1 + 31.5	15,50	0,58	0,58	100	0,09
- 31.5 + 25	57,00	2,13	2,71	99,42	0,33
- 25 + 19	75,00	2,80	5,52	97,29	0,47
- 19 + 12.5	170,00	6,36	11,87	94,48	0,98
- 12.5 + 9.5	287,00	10,73	22,60	88,13	3,58
- 9.5 + 4.75	417,50	15,61	38,21	77,40	3,29
- 4.75 + 2.36	701,00	26,21	64,42	61,79	10,97
- 2.36 + 1.18	483,50	18,08	82,50	35,58	15,32
- 1.18	468,00	17,50	100,00	17,50	14,83
<i>Toplam</i>	<i>2674,50</i>	<i>100,00</i>			

Ek Çizelge 2.2. Kangal linyitine ait elek analizi sonuçları

Tane iriliği (mm)	Ağırlık		Kümülatif elek üstü	Kümülatif elek altı	Normal dağılım oranı
	(g)	(%)			
- 50.8 + 38.1	280,6	11,16	11,16	100	0,88
- 38.1 + 31.5	467,82	18,61	29,77	88,84	2,82
- 31.5 + 25	113,77	4,52	34,29	70,23	0,70
- 25 + 19	137,91	5,49	39,78	65,71	0,91
- 19 + 12.5	247,46	9,84	49,62	60,22	1,51
- 12.5 + 9.5	305,2	12,14	61,76	50,38	4,05
- 9.5 + 4.75	267,83	10,65	72,41	38,24	2,24
- 4.75 + 2.36	241,57	9,61	82,02	27,59	4,02
- 2.36 + 1.18	160,74	6,39	88,41	17,98	5,42
- 1.18	291,4	11,59	100,00	11,59	9,82
<i>Toplam</i>	<i>2514,3</i>	<i>100,00</i>			

Ek Çizelge 2.3. Elbistan linyitine ait elek analizi sonuçları

Tane iriliği (mm)	Ağırlık		Kümülatif elek üstü	Kümülatif elek altı	Normal dağılım oranı
	(g)	(%)			
- 38.1 + 31.5	23,25	0,88	0,88	100	0,13
- 31.5 + 25	55,39	2,09	2,97	99,12	0,32
- 25 + 19	83,78	3,17	6,14	97,03	0,53
- 19 + 12.5	480,89	18,19	24,33	93,86	2,80
- 12.5 + 9.5	429,25	16,23	40,56	75,67	5,41
- 9.5 + 4.75	272,06	10,29	50,85	59,44	2,17
- 4.75 + 2.36	483,04	18,27	69,12	49,15	7,64
- 2.36 + 1.18	289,94	10,96	80,08	30,88	9,29
- 1.18	526,68	19,92	100,00	19,92	16,88
<i>Toplam</i>	<i>2644,28</i>	<i>100,00</i>			

EK 3. Kısa Analizler

Ek Çizelge 3.1. Arguvan kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları

Tane boyutu (mm)	Kaba nem (%)	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu madde (%)	Sabit C* (%)	S (%)	AID (kcal/kg)
38-31	16,21	8,25	27,74	26,34	37,67	3,18	4205
31-25	14,18	8,49	23,24	27,15	41,12	3,22	4463
25-19	16,18	7,54	35,86	27,16	29,44	3,38	2733
19-12	16,29	7,55	38,20	26,32	27,93	3,40	2455
12-9	16,56	8,02	33,06	26,29	32,63	3,41	2894
9-5	16,38	7,70	38,93	26,19	27,18	3,56	2440
5-2.4	15,90	7,93	37,11	25,15	29,81	3,61	2599
2.4-1.2	15,57	7,90	37,45	25,11	29,54	3,48	2518
-1.2	15,56	8,40	43,19	25,44	22,97	3,59	2261
Besleme	15,92	7,96	37,77	25,66	28,61	3,52	2576

*Fark ile

Ek Çizelge 3.2. Kangal kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları

Tane boyutu (mm)	Kaba nem (%)	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu madde (%)	Sabit C* (%)	S (%)	AID (kcal/kg)
50-38	34,55	7,25	33,42	33,42	25,91	2,88	3350
38-31	37,89	7,78	36,89	33,60	21,73	2,91	3173
31-25	40,23	8,49	42,73	30,58	18,20	2,92	2888
25-19	47,25	4,78	42,35	31,25	21,62	2,90	2896
19-12	44,38	6,11	45,21	30,39	18,29	2,91	2843
12-9	45,10	5,34	48,87	30,13	15,66	2,90	2575
9-5	46,19	4,52	48,61	31,27	15,60	2,95	2643
5-2.4	46,48	5,06	47,09	31,67	16,18	2,98	2694
2.4-1.2	47,49	3,85	48,94	32,34	14,87	3,01	2567
-1.2	42,98	4,04	48,28	32,27	15,41	3,02	2668
Besleme	42,56	5,83	43,66	31,91	18,60	2,94	2860

*Fark ile

Ek Çizelge 3.3. Elbistan kömürüne ait havada kuru bazda kısa analiz sonuçları

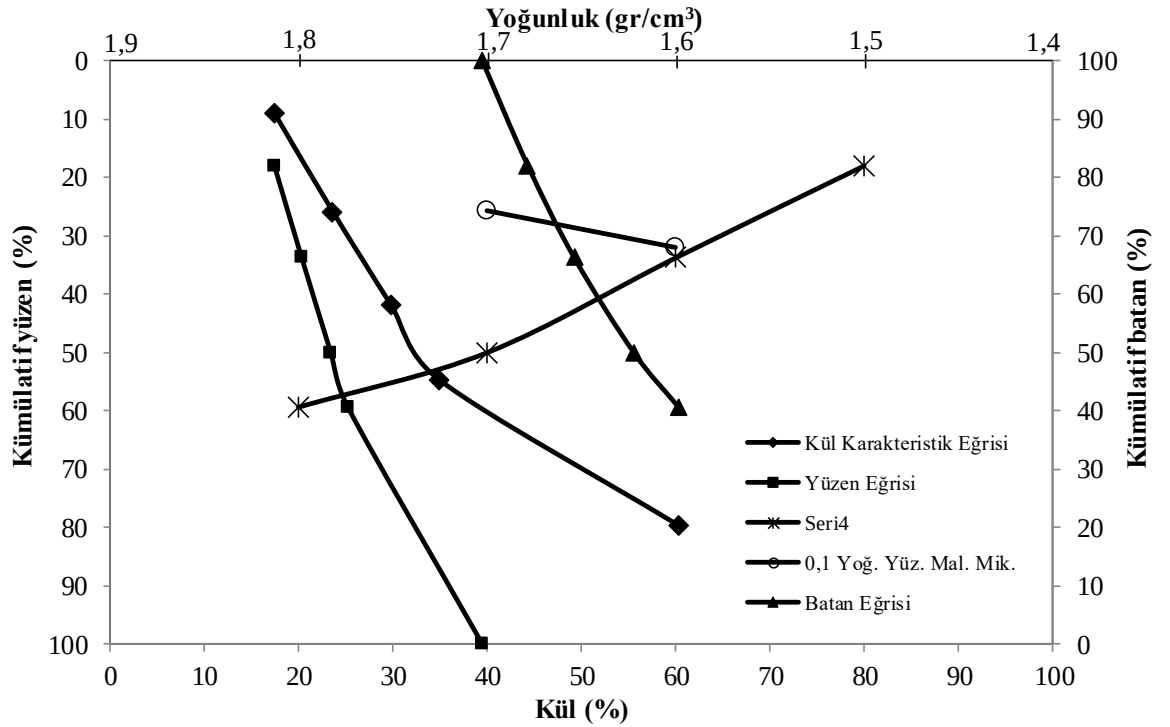
Tane boyutu (mm)	Kaba nem (%)	Nem (%)	Kül (%)	Uçucu madde (%)	Sabit C* (%)	S (%)	AID (kcal/kg)
38-31	55,44	7,86	25,24	35,19	31,71	2,67	4166
31-25	53,04	9,65	27,62	37,73	25,00	2,66	4037
25-19	52,27	9,05	28,25	36,40	26,30	2,68	3851
19-12	50,78	8,89	30,90	37,79	22,42	2,71	3632
12-9	48,61	7,04	37,72	35,78	19,46	2,70	3069
9-5	48,95	7,77	39,90	35,57	16,76	2,69	2763
5-2.4	45,79	5,94	41,82	35,93	16,31	2,71	2627
2.4-1.2	43,90	5,95	45,71	34,81	13,53	2,77	2297
-1.2	40,78	6,09	47,47	34,26	12,18	2,75	1986
Besleme	46,72	7,07	39,65	35,80	17,49	2,72	2813

*Fark ile

EK 4. Yüzdürme-Batırma Deneyleri

Ek Çizelge 4.1. Arguvan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

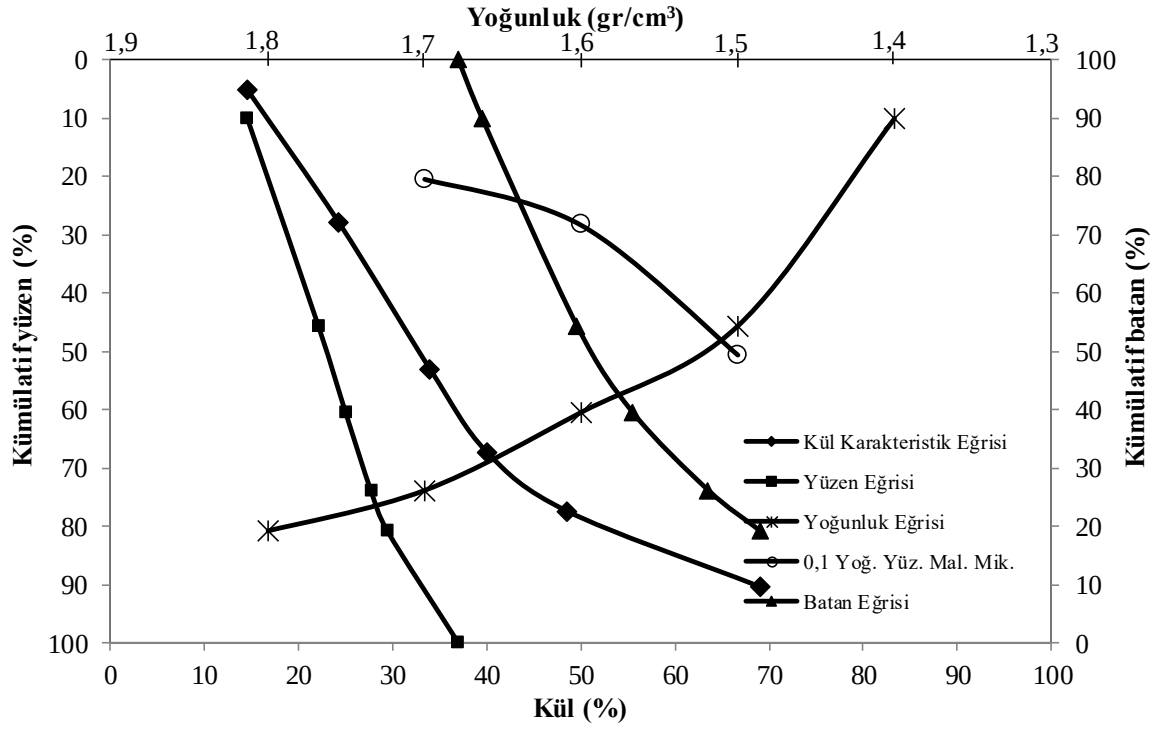
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunluktaki Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordi nat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,5	26,5	17,9	17,3	310,3	17,9	310,3	17,3	100,0	3939,5	39,4	9,0		5106
+ 1,5-1,6	23,4	15,8	23,5	372,1	33,8	682,4	20,2	83,0	3629,2	44,2	25,8	32,1	4532
+ 1,6-1,7	24,1	16,3	29,7	483,7	50,0	1166,1	23,3	66,3	3257,1	49,2	41,9	25,7	3811
+ 1,7-1,8	13,9	9,4	34,9	327,0	59,4	1494,0	25,1	50,0	2773,4	55,5	54,7		3029
+ 1,8	60,0	40,6	60,3	2446,4	100,0	3939,5	39,4	40,6	2446,4	60,3	79,7		-
Toplam	147,8	100,0											



Ek Şekil 4.1. Arguvan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.2. Arguvan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

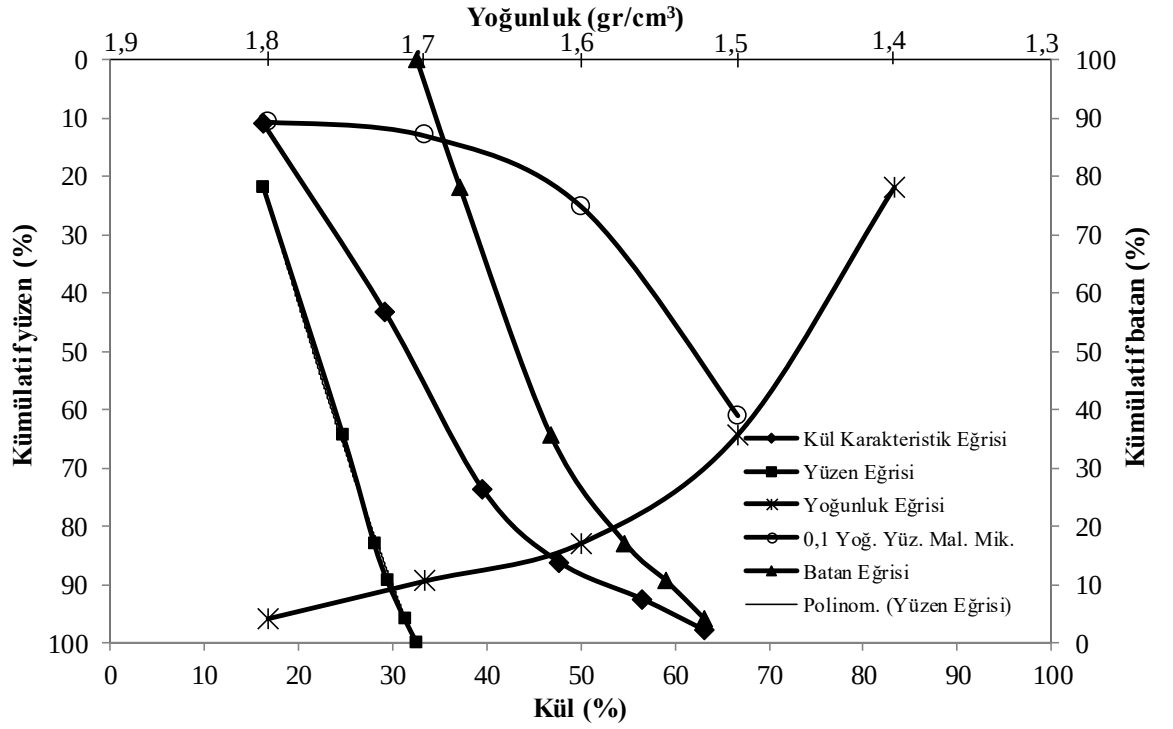
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunluktaki Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,4	76,3	10,0	14,5	145,6	10,0	145,6	14,5	100,0	3704,0	37,0	5,0		5426
+ 1,4-1,5	271,1	35,7	24,3	864,9	45,7	1010,5	22,1	90,0	3558,4	39,6	27,9	50,5	4182
+ 1,5-1,6	112,9	14,9	34,0	504,4	60,6	1514,9	25,0	54,3	2693,5	49,6	53,1	28,3	3297
+ 1,6-1,7	102,1	13,4	39,9	536,3	74,0	2051,2	27,7	39,4	2189,1	55,5	67,3	20,4	2469
+ 1,7-1,8	53,0	7,0	48,5	337,9	80,9	2389,1	29,5	26,0	1652,8	63,5	77,5		1367
+ 1,8	144,8	19,1	69,0	1314,9	100,0	3704,0	37,0	19,1	1314,9	69,0	90,5		-
Toplam	760,2	100,0											



Ek Şekil 4.2. Arguvan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.3. Arguvan linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

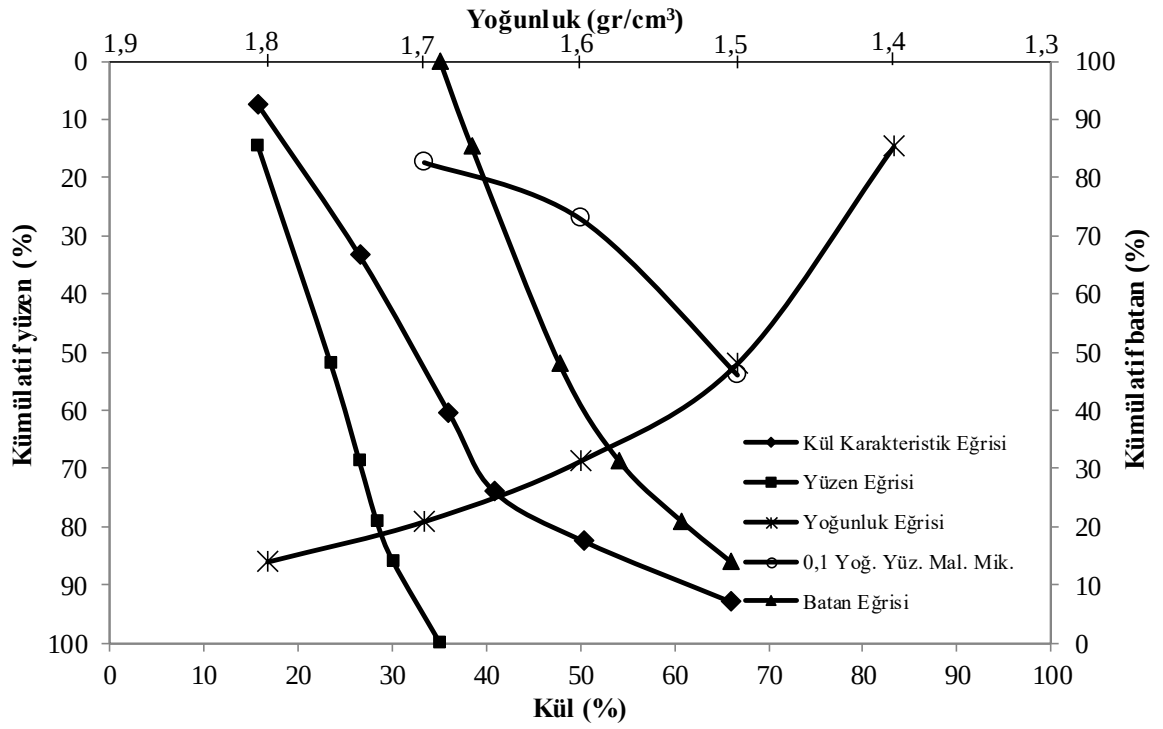
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordi nat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,4	177,1	21,9	16,3	357,7	21,9	357,7	16,3	100,0	3261,3	32,6	11,0		5395
+ 1,4-1,5	342,4	42,4	29,1	1235,1	64,3	1592,8	24,8	78,1	2903,6	37,2	43,1	61,0	3821
+ 1,5-1,6	150,3	18,6	39,5	735,2	82,9	2328,0	28,1	35,7	1668,5	46,8	73,6	25,1	2643
+ 1,6-1,7	52,4	6,5	47,6	308,9	89,4	2636,9	29,5	17,1	933,3	54,7	86,2	12,9	1698
+ 1,7-1,8	52,0	6,4	56,5	363,7	95,9	3000,6	31,3	10,6	624,4	59,1	92,6	10,6	1130
+ 1,8	33,4	4,1	63,1	260,7	100,0	3261,3	32,6	4,1	260,7	63,1	97,9		-
Toplam	807,6	100,0											



Ek Şekil 4.3. Arguvan linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.4. Arguvan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları

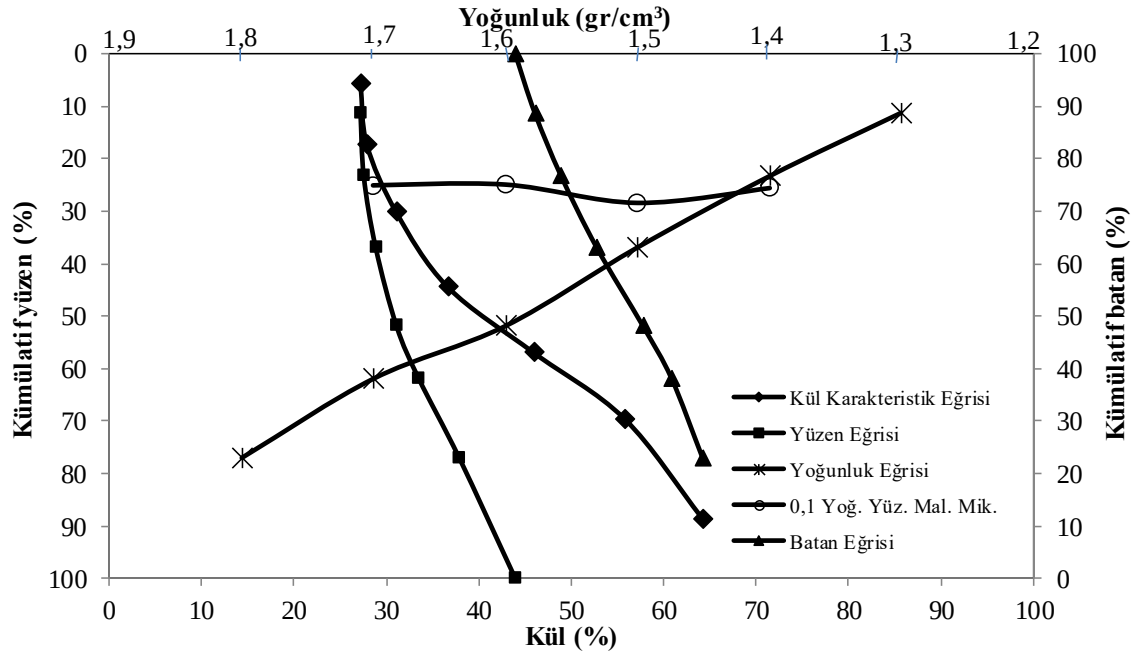
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		S (%)
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,4	253,4	14,8	15,8	232,9	14,8	232,9	15,8	100,0	3515,9	35,2	7,4		2,30
+ 1,4-1,5	640,1	37,3	26,6	991,4	52,1	1224,3	23,5	85,2	3283,0	38,5	33,4	54,0	2,53
+ 1,5-1,6	286,6	16,7	36,0	601,6	68,8	1825,9	26,5	47,9	2291,6	47,8	60,4	27,1	2,34
+ 1,6-1,7	178,6	10,4	40,8	424,7	79,2	2250,6	28,4	31,2	1690,0	54,1	74,0	17,3	2,21
+ 1,7-1,8	118,8	6,9	50,4	349,1	86,1	2599,7	30,2	20,8	1265,3	60,8	82,7		2,37
+ 1,8	238,2	13,9	66,0	916,2	100,0	3515,9	35,2	13,9	916,2	66,0	93,1		3,95
Toplam	1715,6	100,0											



Ek Şekil 4.4. Arguvan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.5. Kangal linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

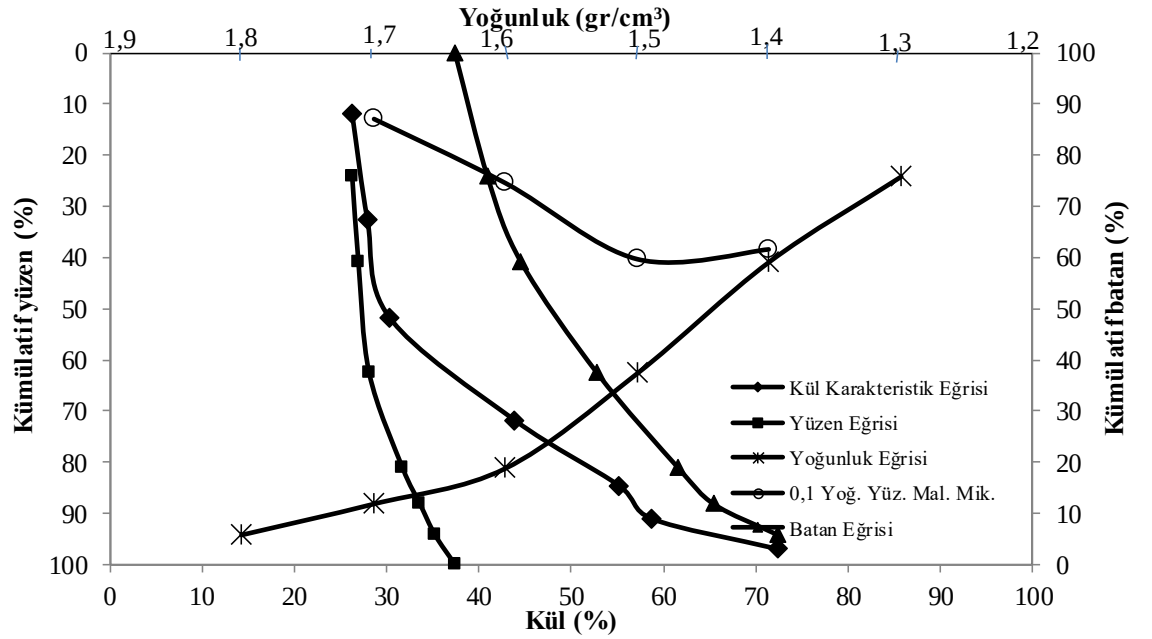
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunluktaki Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	37,4	11,2	27,2	303,7	11,2	303,7	27,2	100,0	4393,7	43,9	5,6		3521
+ 1,3-1,4	33,2	12,1	27,9	337,4	23,3	641,1	27,5	88,8	4090,0	46,0	17,2	25,7	3708
+ 1,4-1,5	30,7	13,6	31,0	422,1	36,9	1063,2	28,8	76,7	3752,6	48,9	30,1	28,6	3760
+ 1,5-1,6	41,1	15,0	36,6	548,7	51,9	1611,9	31,1	63,1	3330,5	52,8	44,4	25,0	3206
+ 1,6-1,7	41,6	10,1	46,0	461,8	61,9	2073,7	33,5	48,1	2781,8	57,8	56,9	25,2	2135
+ 1,7-1,8	27,6	15,1	55,8	844,3	77,0	2918,0	37,9	38,1	2320,0	60,9	69,5		2782
+ 1,8	63,1	23,0	64,3	1475,7	100,0	4393,7	43,9	23,0	1475,7	64,3	88,5		-
Toplam	274,6	100,0											



Ek Şekil 4.5. Kangal linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.6. Kangal linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

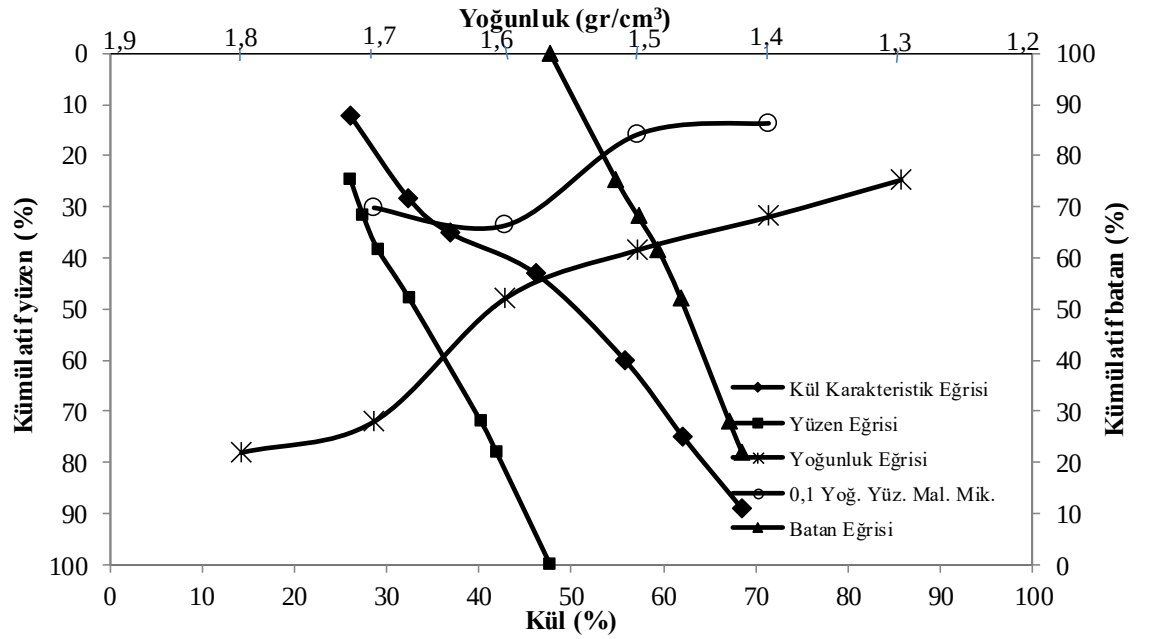
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	74,1	24,3	26,3	639,1	24,3	639,1	26,3	100,0	3736,5	37,4	12,1		3713
+ 1,3-1,4	50,8	16,6	28,0	465,2	40,9	1104,3	27,0	75,7	3097,5	40,9	32,6	38,4	3668
+ 1,4-1,5	66,3	21,7	30,3	659,4	62,7	1763,7	28,1	59,1	2632,2	44,6	51,8	40,3	3481
+ 1,5-1,6	56,5	18,5	43,9	814,3	81,2	2578,1	31,7	37,3	1972,8	52,9	71,9	25,5	2918
+ 1,6-1,7	21,2	7,0	55,2	383,8	88,2	2961,9	33,6	18,8	1158,5	61,7	84,7	13,0	2318
+ 1,7-1,8	18,4	6,0	58,8	354,9	94,2	3316,8	35,2	11,8	774,7	65,5	91,2		2178
+ 1,8	17,7	5,8	72,4	419,8	100,0	3736,5	37,4	5,8	419,8	72,4	97,1		-
Toplam	304,9	100,0											



Ek Şekil 4.6. Kangal linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.7. Kangal linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

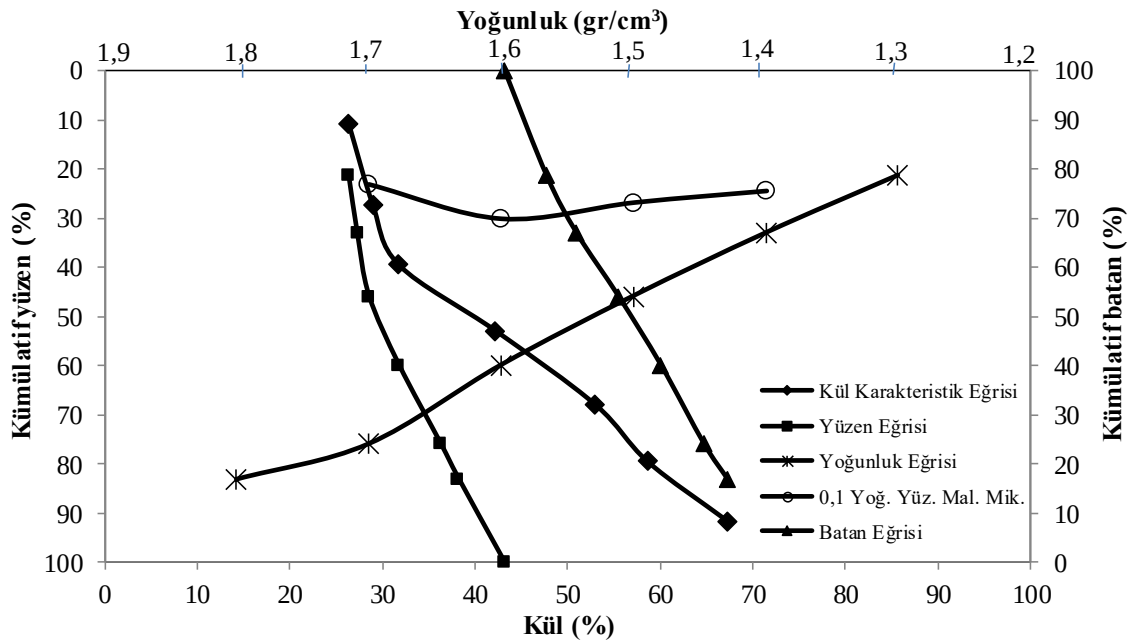
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	90,1	24,7	26,1	643,6	24,7	643,6	26,1	100,0	4779,2	47,8	12,3		3759
+ 1,3-1,4	26,4	7,2	32,3	233,9	31,9	877,5	27,5	75,3	4135,6	54,9	28,3	13,8	3443
+ 1,4-1,5	23,8	6,5	36,9	240,4	38,4	1118,0	29,1	68,1	3901,6	57,3	35,2	16,0	3201
+ 1,5-1,6	34,5	9,5	46,2	436,6	47,9	1554,6	32,5	61,6	3661,2	59,5	43,2	33,6	2675
+ 1,6-1,7	88,2	24,2	55,8	1349,6	72,1	2904,2	40,3	52,1	3224,6	61,9	60,0	30,2	2316
+ 1,7-1,8	21,9	6,0	62,2	373,6	78,1	3277,8	42,0	27,9	1875,0	67,2	75,1		1986
+ 1,8	79,9	21,9	68,5	1501,4	100,0	4779,2	47,8	21,9	1501,4	68,5	89,0		-
Toplam	364,8	100,0											



Ek Şekil 4.7. Kangal linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.8. Kangal linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları

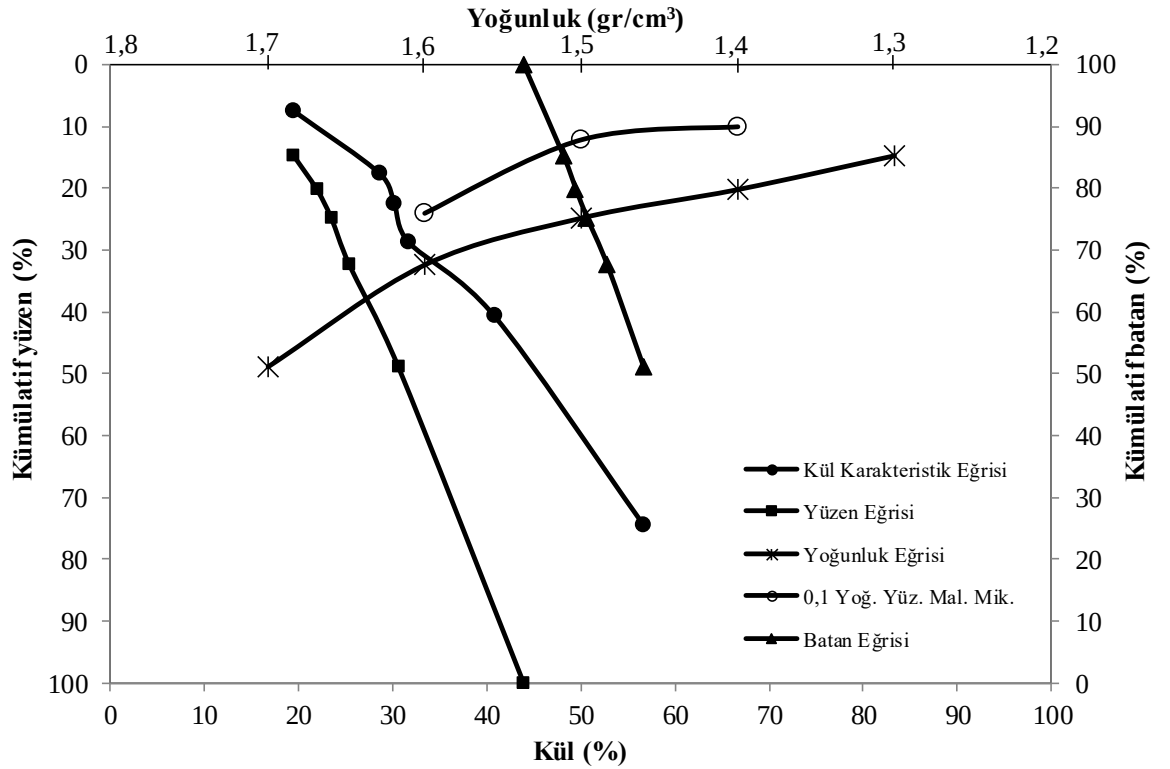
	<i>Yoğunluk Aralığındaki Malzeme</i>				<i>Toplam Yüzen</i>			<i>Toplam Batan</i>			<i>± 0,1 Yoğunlukta ki Malzeme</i>		
Yoğ.	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	S (%)
-1,3	201,5	21,3	26,4	562,5	21,3	562,5	26,4	100,0	4313,2	43,1	10,7		2,22
+ 1,3-1,4	110,4	11,7	29,0	338,7	33,0	901,2	27,3	78,7	3750,7	47,7	27,2	24,5	2,68
+ 1,4-1,5	120,8	12,8	31,8	406,6	45,8	1307,9	28,5	67,0	3412,0	50,9	39,4	26,8	2,34
+ 1,5-1,6	132,1	14,0	42,2	591,2	59,8	1899,0	31,8	54,2	3005,3	55,5	52,8	30,0	2,56
+ 1,6-1,7	151,0	16,0	53,0	847,5	75,8	2746,5	36,2	40,2	2414,2	60,1	67,8	23,2	2,88
+ 1,7-1,8	67,9	7,2	58,7	422,0	83,0	3168,5	38,2	24,2	1566,7	64,7	79,4		3,50
+ 1,8	160,6	17,0	67,3	1144,7	100,0	4313,2	43,1	17,0	1144,7	67,3	91,5		3,72
<i>Toplam</i>	<i>944,2</i>	<i>100,0</i>											



Ek Şekil 4.8. Kangal linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.9. Elbistan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

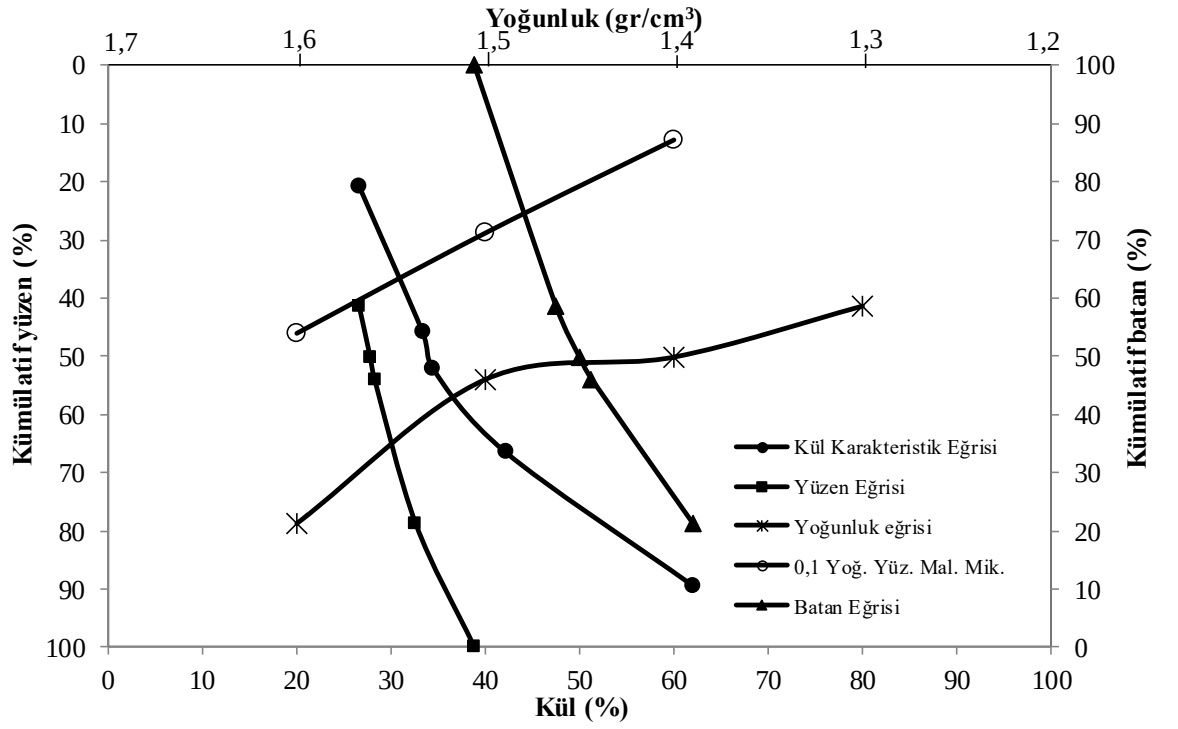
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		AID kcal/k g
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	56,2	14,8	19,5	289,0	14,8	289,0	19,5	100,0	4386,2	43,9	7,4		4742
+ 1,3-1,4	20,7	5,5	28,6	156,5	20,3	445,5	22,0	85,2	4097,3	48,1	17,5	10,1	3870
+ 1,4-1,5	17,5	4,6	30,2	139,6	24,9	585,1	23,5	79,7	3940,8	49,4	22,6	12,2	3721
+ 1,5-1,6	28,7	7,6	31,7	240,2	32,5	825,3	25,4	75,1	3801,1	50,6	28,7	24,1	3575
+1,6-1,7	62,5	16,5	40,8	672,8	49,0	1498,1	30,6	67,5	3560,9	52,7	40,7		2703
+ 1,7	193,6	51,0	56,6	2888,2	100,0	4386,2	43,9	51,0	2888,2	56,6	74,5		1017
Toplam	379,2	100,0											



Ek Şekil 4.9. Elbistan linyitinin -4,75+0,5 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.10. Elbistan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

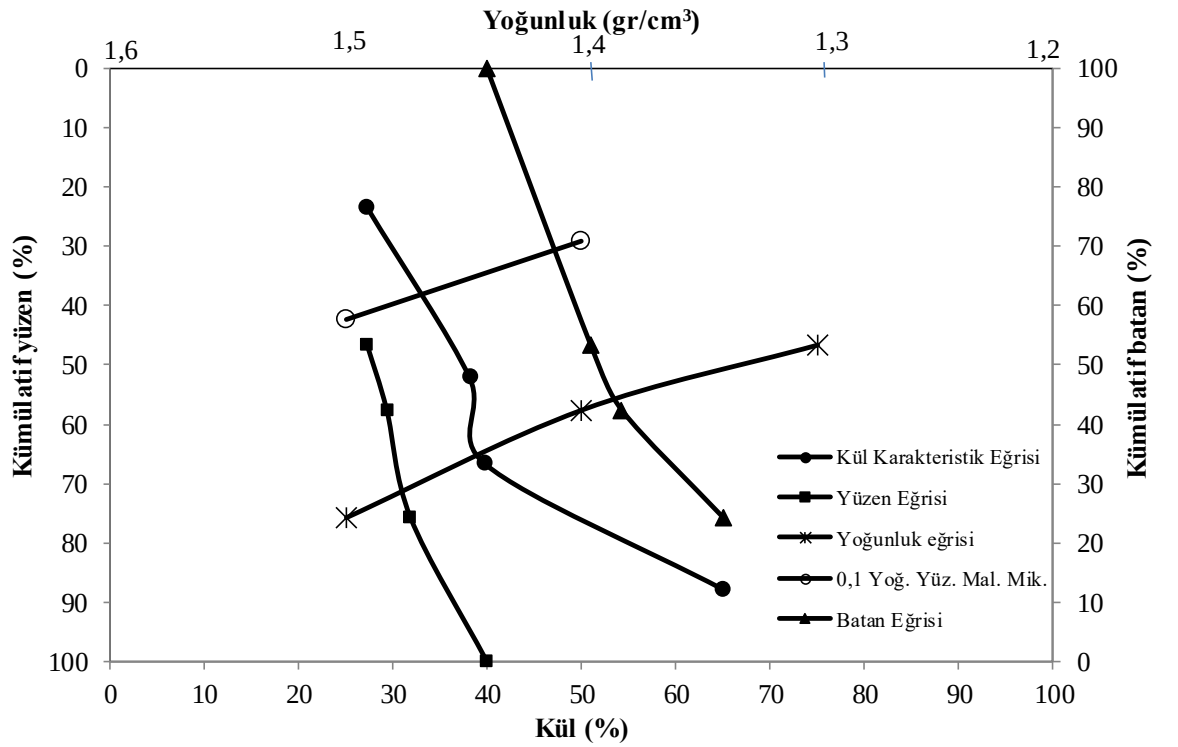
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	202,9	41,4	26,6	1101,6	41,4	1101,6	26,6	100,0	3887,8	38,9	20,7		4060
+ 1,3-1,4	43,1	8,8	33,4	293,2	50,1	1394,7	27,8	58,6	2786,2	47,5	45,7	12,6	3417
+ 1,4-1,5	18,9	3,9	34,5	132,9	54,0	1527,7	28,3	49,9	2493,1	50,0	52,1	28,7	3312
+ 1,5-1,6	121,9	24,8	42,2	1047,5	78,8	2575,2	32,7	46,0	2360,1	51,3	66,4	46,0	2576
+1,6	103,8	21,2	62,0	1312,6	100,0	3887,8	38,9	21,2	1312,6	62,0	89,4		-
Toplam	490,7	100,0											



Ek Şekil 4.10. Elbistan linyitinin -19+4,75 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.11. Elbistan linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma sonuçları

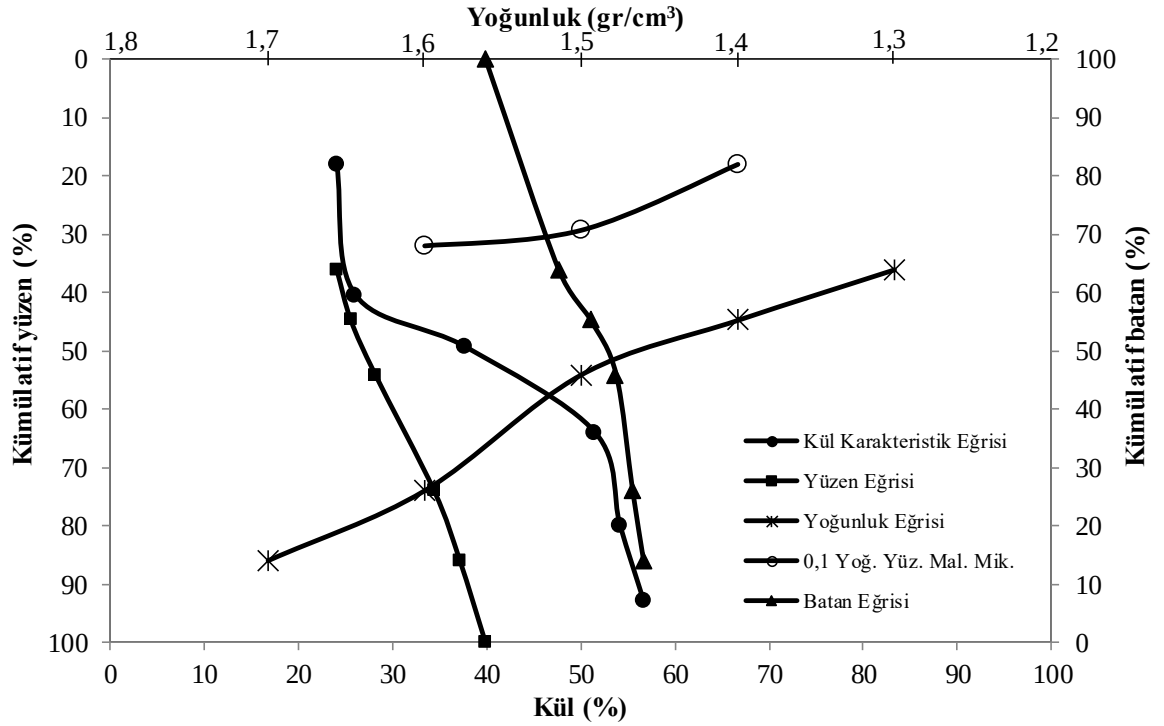
Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunluktaki Malzeme		AID kcal/kg
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	239,4	46,7	27,3	1273,0	46,7	1273,0	27,3	100,0	3989,4	39,9	23,3		3999
+ 1,3-1,4	56,2	10,9	38,2	417,6	57,6	1690,6	29,3	53,3	2716,4	50,9	52,1	29,1	2959
+ 1,4-1,5	93,0	18,1	39,8	721,6	75,7	2412,2	31,8	42,4	2298,8	54,2	66,7	42,4	2802
+ 1,5	124,4	24,3	65,0	1577,2	100,0	3989,4	39,9	24,3	1577,2	65,0	87,9		-
Toplam	513,0	100,0											



Ek Şekil 4.11. Elbistan linyitinin -31,5+19 mm boyutunda yüzdürme-batırma eğrileri

Ek Çizelge 4.12. Elbistan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma sonuçları

Yoğ.	Yoğunluk Aralığındaki Malzeme				Toplam Yüzen			Toplam Batan			± 0,1 Yoğunlukta Malzeme		S (%)
	Mikt. (g)	Mikt. (%)	Kül (%)	İçerik	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Mikt. (%)	Σ İçerik	Kül (%)	Ordinat z	± 0,1 yoğ. malz. mikt.	
-1,3	498,5	36,0	26,1	942,4	36,0	942,4	26,1	100,0	3985,6	39,9	18,0		2,30
+ 1,3-1,4	120,0	8,7	26,0	225,2	44,7	1167,6	26,1	64,0	3043,2	47,6	40,4	18,0	2,21
+ 1,4-1,5	129,5	9,4	37,7	353,2	54,1	1520,8	28,1	55,3	2818,0	51,0	49,4	29,3	2,33
+ 1,5-1,6	275,1	19,9	51,4	1022,6	74,0	2543,4	34,4	45,9	2464,8	53,7	64,0	31,9	2,39
+ 1,6-1,7	166,3	12,0	54,1	650,2	86,0	3193,6	37,1	26,0	1442,2	55,4	80,0	26,0	2,34
+1,7	193,6	14,0	56,6	791,9	100,0	3985,6	39,9	14,0	791,9	56,6	93,0		2,39
Toplam	1382,9	100,0											



Ek Şekil 4.12. Elbistan linyiti tane boyutlarının birleştirilmesiyle elde edilen yüzdürme-batırma eğrileri

EK 5. Sallantılı Masa Deneyleri

Sallantılı masa deneylerine ait yanabilir verim değerleri aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

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

$$\% \text{ Mikst Yanabilir Verim} = \frac{M (100 - m)}{F (100 - f)} \times 100$$

$$\% \text{ Şist Yanabilir Verim} = \frac{T (100 - t)}{F (100 - f)} \times 100$$

F = Zenginleştirme ünitesine beslenen kömür miktarı (g),

C = Lave (temiz) kömür miktarı (g),

T = Şist (artık) miktarı (g),

M = Mikst (ara ürün) miktarı (g),

f = Beslemedeki kül (%),

c = Lavedeki kül (%),

t = Şistteki kül (%).

Ek Çizelge 5.1. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa hızı (dev/dk)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	100	Lave	31,89	79,05	3,71	18,17	3331
		Mikst	48,13	7,38	-	-	1280
	150	Lave	26,89	79,94	3,07	32,62	4119
		Mikst	46,96	6,94	-	-	1428
	200	Lave	27,93	70,32	3,27	28,23	3899
		Mikst	40,21	14,52	-	-	2291
-2+1,18	100	Lave	27,30	81,94	3,78	14,18	3814
		Mikst	46,20	3,98	-	-	1525
	150	Lave	26,05	81,51	3,05	31,00	4148
		Mikst	46,19	6,19	-	-	1525
	200	Lave	31,27	75,95	3,75	20,54	3446
		Mikst	41,21	9,00	-	-	2159
-1,18+0,15	100	Lave	29,17	84,33	2,92	31,27	3741
		Mikst	51,10	3,97	-	-	1001
	150	Lave	26,43	81,04	2,82	37,23	4022
		Mikst	47,50	7,12	-	-	1360
	200	Lave	25,87	77,50	2,54	46,36	4315
		Mikst	43,32	6,40	-	-	1890
Besleme			37,77		3,85		2576

Ek Çizelge 5.2. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa eğimi (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-3,35+2	2	Lave	32,97	85,07	3,35	19,47	3337
		Mikst	53,56	4,47	-	-	884
	4	Lave	26,89	79,94	3,07	32,62	4119
		Mikst	46,96	6,94	-	-	1428
	6	Lave	30,79	73,85	3,51	26,96	3410
		Mikst	44,27	14,66	-	-	1769
-2+1,18	2	Lave	33,26	85,74	3,48	16,19	3189
		Mikst	61,00	3,43	-	-	Okunamadı
	4	Lave	26,05	81,51	3,05	31,00	4148
		Mikst	46,19	6,19	-	-	1525
	6	Lave	26,57	83,41	3,55	17,52	4088
		Mikst	51,56	5,49	-	-	897
-1,18+0,15	2	Lave	30,24	83,39	3,22	25,43	3586
		Mikst	54,55	4,13	-	-	869
	4	Lave	26,43	81,04	2,82	37,23	4022
		Mikst	47,50	7,12	-	-	1360
	6	Lave	28,75	74,07	3,29	32,21	3719
		Mikst	43,50	12,99	-	-	1868
Besleme			37,77		3,85		2576

Ek Çizelge 5.3. Kangal linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa hızı (dev/dk)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	100	Lave	40,27	85,93	2,89	11,02	2998
		Mikst	74,09	3,42	-	-	Okunamadı
	150	Lave	35,74	80,44	2,34	33,21	3268
		Mikst	60,91	8,32	-	-	2035
	200	Lave	42,61	79,89	2,90	23,61	2901
		Mikst	76,28	8,84	-	-	Okunamadı
-2+1,18	100	Lave	40,50	87,71	2,83	9,22	3057
		Mikst	75,78	1,07	-	-	Okunamadı
	150	Lave	33,60	81,02	2,24	38,99	3402
		Mikst	71,98	7,99	-	-	Okunamadı
	200	Lave	37,74	79,13	2,87	19,54	3164
		Mikst	60,33	8,33	-	-	2060
-1,18+0,15	100	Lave	43,02	83,93	2,24	33,56	2912
		Mikst	61,33	2,26	-	-	2011
	150	Lave	40,33	81,9	2,15	38,55	2995
		Mikst	69,84	5,68	-	-	Okunamadı
	200	Lave	31,82	71,73	1,94	52,12	3495
		Mikst	58,89	14,21	-	-	2133
Besleme			43,66		2,94		2860

Ek Çizelge 5.4. Kangal linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa eğimi (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-3,35+2	2	Lave	30,52	78,97	2,11	75,48	3503
		Mikst	41,42	7,03	-	-	2964
	4	Lave	35,74	80,44	2,34	33,21	3268
		Mikst	60,91	8,32	-	-	2035
	6	Lave	31,15	67,65	2,87	47,90	3488
		Mikst	43,73	15,99	-	-	2854
-2+1,18	2	Lave	28,78	79,36	1,92	65,40	3606
		Mikst	48,97	8,45	-	-	2604
	4	Lave	33,60	81,02	2,24	38,99	3402
		Mikst	71,98	7,99	-	-	Okunamadı
	6	Lave	30,15	68,78	2,72	31,24	3566
		Mikst	43,44	19,81	-	-	2868
-1,18+0,15	2	Lave	23,31	80,66	1,71	71,75	3916
		Mikst	40,39	5,80	-	-	3013
	4	Lave	31,82	71,73	1,94	52,12	3495
		Mikst	58,89	14,21	-	-	2133
	6	Lave	34,28	63,12	2,51	43,45	3305
		Mikst	46,94	17,46	-	-	2701
Besleme			43,66		2,94		2860

Ek Çizelge 5.5. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre masa hızı deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa hızı (dev/dk)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	100	Lave	35,89	81,33	2,61	16,83	3181
		Mikst	53,79	5,94	-	-	1463
	150	Lave	34,45	83,12	2,33	26,22	3315
		Mikst	68,15	4,62	-	-	Okunamadı
	200	Lave	38,13	80,37	2,49	18,72	2976
		Mikst	40,70	5,26	-	-	2715
-2+1,18	100	Lave	36,32	79,02	2,60	18,91	3149
		Mikst	41,53	5,82	-	-	2636
	150	Lave	35,26	78,93	2,31	29,30	3248
		Mikst	41,85	6,84	-	-	2605
	200	Lave	37,61	80,63	2,46	21,27	3024
		Mikst	43,56	2,50	-	-	2442
-1,18+0,15	100	Lave	37,05	74,25	2,59	23,98	3072
		Mikst	50,31	4,55	-	-	1796
	150	Lave	35,09	79,70	2,28	30,75	3258
		Mikst	42,93	5,17	-	-	2502
	200	Lave	33,33	79,42	2,15	36,81	3430
		Mikst	42,57	4,08	-	-	2536
Besleme			39,65		2,72		2813

Ek Çizelge 5.6. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre masa eğimi deney sonuçları

Tane Boyutu (mm)	Masa eğimi (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-3,35+2	2	Lave	37,41	79,46	2,38	24,00	3038
		Mikst	50,03	6,07	-	-	1823
	4	Lave	34,45	83,12	2,33	26,22	3315
		Mikst	68,15	4,62	-	-	Okunamadı
	6	Lave	35,93	80,90	2,48	21,33	3194
		Mikst	43,30	5,92	-	-	2467
-2+1,18	2	Lave	38,01	78,58	2,35	26,19	2985
		Mikst	45,37	4,15	-	-	2441
	4	Lave	35,26	78,93	2,31	29,30	3248
		Mikst	41,85	6,84	-	-	2605
	6	Lave	37,09	78,87	2,52	21,63	3066
		Mikst	42,31	5,34	-	-	2561
-1,18+0,15	2	Lave	36,23	77,91	2,26	31,52	3142
		Mikst	48,61	4,26	-	-	1959
	4	Lave	33,33	79,42	2,15	36,81	3430
		Mikst	42,57	4,08	-	-	2536
	6	Lave	35,07	78,08	2,45	26,75	3078
		Mikst	55,44	4,24	-	-	1306
Besleme			39,65		2,72		28,13

EK 6. Reichert Spirali Deneyleri

Ek Çizelge 6.1. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre pülpte katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Pülpte katı oranı (%)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	35	Lave	34,26	77,19	3,50	19,50	3094
		Mikst	48,22	7,12	-	-	1267
	25	Lave	34,03	79,11	3,57	20,39	3154
		Mikst	48,05	7,65	-	-	1288
	15	Lave	33,16	76,94	3,67	20,67	3197
		Mikst	46,76	8,59	-	-	1452
	7,5	Lave	34,68	78,35	3,71	17,67	3019
		Mikst	47,22	9,02	-	-	1394
-2+1,18	35	Lave	32,93	79,84	3,00	35,00	3297
		Mikst	52,66	4,22	-	-	882
	25	Lave	32,50	81,38	3,02	32,34	3366
		Mikst	52,41	5,31	-	-	899
	15	Lave	32,88	78,09	3,65	20,76	3335
		Mikst	50,09	8,22	-	-	1029
	7,5	Lave	32,96	79,85	3,72	17,31	3269
		Mikst	54,33	7,22	-	-	816
-1,18+0,15	35	Lave	34,33	75,95	2,80	36,00	3095
		Mikst	48,99	4,12	-	-	1168
	25	Lave	33,94	82,17	2,85	34,36	3201
		Mikst	48,78	4,60	-	-	1196
	15	Lave	34,26	78,39	3,70	18,63	3194
		Mikst	46,34	7,71	-	-	1506
	7,5	Lave	34,84	74,74	3,74	21,23	3052
		Mikst	45,68	10,37	-	-	1590
Besleme			37,77		3,85		2576

Ek Çizelge 6.2. Arguvan linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Bıçak ayarı (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-3,35+2	150	Lave	34,03	79,11	3,57	20,39	3154
		Mikst	48,05	7,65	-	-	1288
	120	Lave	28,16	75,63	3,05	38,64	3889
		Mikst	44,46	4,47	-	-	1745
	90	Lave	27,90	69,30	3,05	41,30	3925
		Mikst	44,16	4,51	-	-	1783
-2+1,18	150	Lave	32,88	78,10	3,02	32,34	3335
		Mikst	50,09	8,22	-	-	1029
	120	Lave	27,17	75,50	2,96	40,83	3954
		Mikst	51,54	4,75	-	-	845
	90	Lave	26,50	69,20	2,96	41,20	4110
		Mikst	51,44	4,62	-	-	857
-1,18+0,15	150	Lave	33,94	82,17	2,85	34,36	3201
		Mikst	48,78	4,60	-	-	1196
	120	Lave	24,30	81,81	2,08	56,23	4382
		Mikst	60,61	4,58	-	-	Okunamadı
	90	Lave	22,10	70,10	2,08	57,01	4590
		Mikst	59,33	4,52	-	-	Okunamadı
Besleme			37,77		3,85		2576

Ek Çizelge 6.3. Kangal linyitinin tane boyutuna göre pülpte katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Pülpte katı oranı (%)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-3,35+2	35	Lave	27,00	70,10	1,88	50,00	3670
		Mikst	69,15	6,89	-	-	Okunamadı
	25	Lave	27,59	81,79	1,88	54,14	3689
		Mikst	68,25	7,13	-	-	Okunamadı
	15	Lave	31,89	75,20	2,80	32,62	3457
		Mikst	65,89	8,61	-	-	Okunamadı
	7,5	Lave	32,86	71,43	2,85	32,35	3394
		Mikst	60,59	10,08	-	-	-
-2+1,18	35	Lave	24,95	65,30	1,83	57,00	3770
		Mikst	69,15	7,11	-	-	Okunamadı
	25	Lave	25,29	81,46	1,82	57,11	3781
		Mikst	68,79	7,58	-	-	Okunamadı
	15	Lave	30,66	72,21	2,46	43,33	3562
		Mikst	65,39	8,48	-	-	Okunamadı
	7,5	Lave	32,19	69,98	2,71	38,34	3415
		Mikst	62,42	9,66	-	-	Okunamadı
-1,18+0,15	35	Lave	24,10	62,55	1,75	60,00	3810
		Mikst	67,99	7,99	-	-	Okunamadı
	25	Lave	23,33	76,25	1,75	62,04	3886
		Mikst	67,53	9,68	-	-	Okunamadı
	15	Lave	28,45	69,47	2,35	49,64	3601
		Mikst	65,88	9,98	-	-	Okunamadı
	7,5	Lave	29,84	70,90	2,56	42,65	3584
		Mikst	65,67	8,43	-	-	Okunamadı
Besleme			43,66		2,94		2860

Ek Çizelge 6.4. Kangal linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Bıçak ayarı (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	150	Lave	27,59	81,79	1,88	54,14	3689
		Mikst	68,25	7,13	-	-	Okunamadı
	120	Lave	22,46	80,02	1,52	62,97	3884
		Mikst	72,16	5,48	-	-	Okunamadı
	90	Lave	22,20	70,00	1,50	50,00	3900
		Mikst	73,15	5,12	-	-	Okunamadı
-2+1,18	150	Lave	25,29	81,46	1,82	57,11	3781
		Mikst	68,79	7,58	-	-	Okunamadı
	120	Lave	20,11	77,82	1,32	69,34	4008
		Mikst	70,35	6,80	-	-	Okunamadı
	90	Lave	20,00	66,03	1,29	69,00	4010
		Mikst	71,06	5,99	-	-	Okunamadı
-1,18+0,15	150	Lave	23,33	76,25	1,75	62,04	3886
		Mikst	67,53	9,68	-	-	Okunamadı
	120	Lave	18,46	75,17	1,00	77,76	4191
		Mikst	66,89	9,06	-	-	Okunamadı
	90	Lave	18,00	65,22	1,05	74,30	4190
		Mikst	67,88	8,21	-	-	Okunamadı
Besleme			43,66		2,94		2860

Ek Çizelge 6.5. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre pülpte katı oranına bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Pülpte katı oranı (%)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değeri (kcal/kg)
-3,35+2	35	Lave	33,00	59,00	2,20	47,00	3450
		Mikst	41,03	12,88	-	-	2684
	25	Lave	33,49	69,15	2,20	42,44	3412
		Mikst	40,87	13,33	-	-	2699
	15	Lave	33,79	64,19	2,43	40,24	3388
		Mikst	38,16	16,29	-	-	2958
	7,5	Lave	34,09	65,92	2,62	33,38	3361
		Mikst	38,86	13,54	-	-	2891
-2+1,18	35	Lave	32,50	60,00	2,15	48,24	3500
		Mikst	37,11	10,63	-	-	3058
	25	Lave	32,73	66,98	2,16	45,51	3494
		Mikst	36,36	13,95	-	-	3130
	15	Lave	33,42	62,78	2,35	43,51	3420
		Mikst	34,61	15,58	-	-	3298
	7,5	Lave	34,16	63,76	2,50	38,40	3364
		Mikst	36,04	14,91	-	-	3161
-1,18+0,15	35	Lave	30,00	54,00	2,00	50,00	3740
		Mikst	41,26	15,36	-	-	2662
	25	Lave	30,55	62,00	2,05	53,16	3695
		Mikst	40,53	18,72	-	-	2732
	15	Lave	32,33	59,95	2,12	51,38	3522
		Mikst	39,25	17,36	-	-	2854
	7,5	Lave	34,55	55,20	2,42	47,15	3309
		Mikst	39,16	21,22	-	-	283
Besleme			39,65		2,72		2813

Ek Çizelge 6.6. Elbistan linyitinin tane boyutuna göre bıçak konumuna bağlı olarak lave kül ve yanabilir verim değişimi çizelgesi

Tane Boyutu (mm)	Bıçak ayarı (°)	Ürünler	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısıl değer (kcal/kg)
-3,35+2	150	Lave	33,49	69,15	2,20	42,44	3412
		Mikst	40,87	13,33	-	-	2699
	120	Lave	29,03	71,17	1,94	50,20	3841
		Mikst	46,22	12,61	-	-	2188
	90	Lave	27,80	60,17	1,95	50,00	3840
		Mikst	47,16	11,12	-	-	2098
-2+1,18	150	Lave	32,73	66,98	2,16	45,51	3494
		Mikst	36,36	13,95	-	-	3131
	120	Lave	28,11	70,21	1,80	55,36	3919
		Mikst	40,22	11,24	-	-	2761
	90	Lave	27,20	62,30	1,80	56,00	3940
		Mikst	41,23	10,98	-	-	2665
-1,18+0,15	150	Lave	30,55	62,00	2,05	53,16	3695
		Mikst	40,53	18,72	-	-	2732
	120	Lave	27,19	64,96	1,76	60,06	4016
		Mikst	47,35	17,24	-	-	2079
	90	Lave	26,50	55,60	1,79	65,16	4000
		Mikst	48,22	15,68	-	-	1996
Besleme			39,65		2,72		2813

EK 7. Falcon Deneyleri

Ek Çizelge 7.1. Arguvan linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi

Tane boyutu (µm)	Merkezkaç kuvvet (G)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-500	20	36,14	87,10	3,82	27,78	2901
	78	37,23	79,47	3,81	27,80	2709
	176	37,92	64,90	3,81	27,81	2651
	300	32,57	60,36	3,80	27,79	3284
-212	20	41,11	81,94	3,81	17,48	2212
	78.	39,11	82,13	3,80	17,50	2490
	176	40,07	79,64	3,79	17,52	2383
	300	38,10	78,88	3,79	17,58	2506
-150	20	40,65	88,06	3,79	16,09	2259
	78	39,68	81,89	3,77	16,23	2379
	176	39,55	81,01	3,77	16,44	2395
	300	37,36	80,65	3,76	16,99	2618

Ek Çizelge 7.2. Kangal linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi

Tane boyutu (µm)	Merkezkaç kuvvet (G)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-500	20	42,43	86,29	2,93	30,56	2924
	78	41,14	78,44	2,92	30,98	3005
	176	40,15	71,52	2,90	31,33	3098
	300	40,02	63,24	2,90	31,66	3049
-212	20	42,74	88,77	2,96	14,89	2914
	78	42,77	86,33	2,92	15,16	2889
	176	41,85	80,90	2,92	15,22	2967
	300	40,03	80,84	2,90	15,58	3054
-150	20	42,82	87,86	2,91	13,88	2901
	78	41,00	85,65	2,89	13,94	2993
	176	41,21	82,04	2,87	14,11	2956
	300	40,27	82,33	2,87	14,53	3049

Ek Çizelge 7.3. Elbistan linyitinin farklı tane boyutlarında gerçekleştirilen merkezkaç kuvvetine bağlı olarak kül ve kükürt değişimi çizelgesi

Tane boyutu (µm)	Merkezkaç kuvvet (G)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-500	20	38,94	87,63	2,75	34,97	2896
	78	37,13	83,65	2,75	35,04	3069
	176	35,51	82,56	2,74	35,11	3221
	300	35,40	58,65	2,71	35,73	3241
-212	20	38,03	76,49	2,72	33,98	2980
	78	36,48	75,53	2,70	34,03	3125
	176	34,12	73,95	2,69	34,22	3349
	300	33,37	62,89	2,69	34,41	3426
-150	20	36,57	75,65	2,72	29,44	3117
	78	34,14	72,76	2,72	29,51	3357
	176	33,15	69,91	2,70	29,98	3442
	300	32,05	71,12	2,69	30,12	3564

EK 8. Flotasyon Deneyleri

Ek Çizelge 8.1. Arguvan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları

Tane boyutu (μm)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-212	49,16	19,90	3,85	-	1815
-150	43,91	23,10	3,84	24,11	1880
-106	47,70	20,80	3,86	-	1854

Ek Çizelge 8.2. -150 μm boyutlu Arguvan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları

Toplayıcı cinsi	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
Gazyağı	43,91	23,10	3,84	24,11	1880
Mazot	45,81	37,20	3,85	-	1805
Gazyağı+Mazot	43,37	47,20	3,83	24,72	1884

Ek Çizelge 8.3. Kangal linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları

Tane boyutu (μm)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-212	55,99	50,50	2,96	-	2214
-150	56,68	46,51	2,96	-	2125
-106	47,70	33,98	2,97	-	2661

Ek Çizelge 8.4. -106 µm boyutlu Kangal linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları

Toplayıcı cinsi	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
Gazyağı	47,70	33,98	2,97	-	2661
Mazot	45,81	37,21	2,98	-	2750
Gazyağı+Mazot	41,19	49,00	2,99	-	2980

Ek Çizelge 8.5. Elbistan linyitinin tane boyutuna bağlı olarak gazyağı ile yapılan flotasyon sonuçları

Tane boyutu (µm)	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
-212	43,95	29,69	2,75	-	2405
-150	43,56	24,53	2,73	-	2448
-106	42,36	31,64	2,72	-	2511

Ek Çizelge 8.6. -106 µm boyutlu Elbistan linyitinin flotasyon toplayıcı cinsine göre yapılan flotasyon sonuçları

Toplayıcı cinsi	Kül (%)	Yanabilir verim (%)	Kükürt (%)	Kükürt uzaklaştırma verimi (%)	Alt ısı değer (kcal/kg)
Gazyağı	42,36	31,64	2,72	-	2511
Mazot	44,33	41,23	2,73	-	2367
Gazyağı+Mazot	41,59	49,15	2,70	20,19	2550

EK 9. Piroliz Deneyleri

Piroliz ürünlerinin verimleri ve piroliz dönüşümü aşağıda verilen formüller kullanılarak belirlenmiştir.

$$\% \text{ Katı kalıntı (Çar)} = \frac{\text{Reaktörde kalan katı}}{\text{Reaktöre beslenen örnek}} \times 100$$

$$\% \text{ Sıvı} = \frac{\text{Faz ayırıcından alınan toplam sıvı}}{\text{Reaktöre beslenen örnek}} \times 100$$

$$\% \text{ Gaz} = \frac{\text{Reaktöre beslenen örnek} - (\text{Katı kalıntı} + \text{Sıvı})}{\text{Reaktöre beslenen örnek}} \times 100$$

$$\% \text{ Toplam dönüşüm} = \frac{\text{Reaktöre beslenen örnek} - \text{Katı kalıntı}}{\text{Reaktöre beslenen örnek}} \times 100$$

Ek Çizelge 9.1. Arguvan kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları

%	-1,18 mm	-3,35 mm	-4,75 mm
Çar (Semi-kok)	62,01	62,25	59,95
Sıvı	28,23	29,13	29,25
Gaz	9,76	8,62	10,80
Toplam dönüşüm	82,28	82,22	80,04
Çar (Semi-kok) analizleri			
Kül	57,47	53,01	53,57
Uçucu madde	7,22	6,84	6,59
Sabit C (Fark ile)	35,31	40,15	39,84

Ek Çizelge 9.2. Arguvan kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları

%	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
Çar (Semi-kok)	75,22	62,25	57,75	55,14	54,75
Sıvı	15,79	29,13	26,94	28,03	29,57
Gaz	8,99	8,62	15,31	16,83	15,68
Toplam dönüşüm	78,61	82,22	83,51	84,26	84,37
Çar (Semi-kok) analizleri					
Kül	53,04	53,01	57,42	61,84	62,48
Uçucu madde	9,08	6,84	8,24	6,49	2,69
Sabit C (Fark ile)	37,88	40,15	34,34	31,67	34,83
Kükürt	3,26	3,02	2,75	2,72	2,71

Ek Çizelge 9.3. Arguvan kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları

%	15 dakika	30 dakika	45 dakika	60 dakika
Çar (Semi-kok)	61,59	62,25	64,20	61,30
Sıvı	26,54	29,13	23,88	28,78
Gaz	11,87	8,62	11,92	9,92
Toplam dönüşüm	82,43	82,22	81,93	82,96
Çar (Semi-kok) analizleri				
Kül	54,61	53,01	53,14	53,80
Uçucu madde	6,39	6,84	7,11	6,39
Sabit C (Fark ile)	39,00	40,15	39,75	39,81

Ek Çizelge 9.4. Kangal kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları

%	-1,18 mm	-3,35 mm	-4,75 mm
Çar (Semi-kok)	54,06	58,42	61,70
Sıvı	19,11	18,88	19,92
Gaz	26,83	22,70	18,38
Toplam dönüşüm	84,56	83,55	82,42
Çar (Semi-kok) analizleri			
Kül	63,93	65,84	58,70
Uçucu madde	18,20	16,73	11,17
Sabit C (Fark ile)	17,87	17,43	30,13

Ek Çizelge 9.5. Kangal kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları

%	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
Çar (Semi-kok)	76,01	61,70	63,33	61,25	60,23
Sıvı	8,78	19,92	19,17	17,04	16,21
Gaz	15,21	18,38	17,50	21,71	23,56
Toplam dönüşüm	78,35	82,42	81,99	82,51	82,92
Çar (Semi-kok) analizleri					
Kül	57,55	58,70	66,07	69,33	73,30
Uçucu madde	16,54	11,17	10,09	10,98	8,92
Sabit C (Fark ile)	25,91	30,13	23,84	19,69	17,78
Kükürt	2,87	2,42	2,39	2,37	2,36

Ek Çizelge 9.6. Kangal kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları

%	15 dakika	30 dakika	45 dakika	60 dakika
Çar (Semi-kok)	70,90	61,70	61,00	60,94
Sıvı	16,94	19,92	16,92	15,69
Gaz	12,16	18,38	22,08	23,37
Toplam dönüşüm	79,81	82,42	82,75	82,65
Çar (Semi-kok) analizleri				
Kül	61,44	58,70	62,68	63,77
Uçucu madde	18,59	11,17	11,02	10,44
Sabit C (Fark ile)	19,97	30,13	26,30	25,79

Ek Çizelge 9.7. Elbistan kömürüne ait optimum tane boyutu belirleme piroliz deney sonuçları

%	-1,18 mm	-3,35 mm	-4,75 mm
Çar (Semi-kok)	66,09	65,86	66,97
Sıvı	22,30	22,66	22,11
Gaz	11,61	11,48	10,92
Toplam dönüşüm	81,26	81,20	80,88
Çar (Semi-kok) analizleri			
Kül	58,22	57,65	56,86
Uçucu madde	20,66	21,68	22,79
Sabit C (Fark ile)	21,12	20,67	20,35

Ek Çizelge 9.8. Elbistan kömürüne ait optimum sıcaklık belirleme piroliz deney sonuçları

%	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
Çar (Semi-kok)	69,89	66,97	66,46	56,53	55,86
Sıvı	19,22	22,11	22,80	24,01	24,56
Gaz	10,89	10,92	10,74	19,46	19,58
Toplam dönüşüm	80,06	80,88	81,02	80,89	81,04
Çar (Semi-kok) analizleri					
Kül	56,82	56,86	56,13	62,73	64,71
Uçucu madde	24,91	22,79	19,77	16,64	14,44
Sabit C (Fark ile)	18,27	20,35	24,10	20,63	20,85
Kükürt	2,71	2,61	2,34	2,32	2,32

Ek Çizelge 9.9. Elbistan kömürüne ait süre belirleme piroliz deney sonuçları

%	15 dakika	30 dakika	45 dakika	60 dakika
Çar (Semi-kok)	66,12	66,46	65,96	65,83
Sıvı	21,87	22,80	22,92	22,97
Gaz	12,01	10,74	11,12	11,20
Toplam dönüşüm	81,05	81,02	81,11	81,20
Çar (Semi-kok) analizleri				
Kül	57,16	56,13	56,68	57,01
Uçucu madde	19,22	19,77	19,71	19,69
Sabit C (Fark ile)	23,62	24,10	23,61	23,30

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Aydan AKSOĞAN KORKMAZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya-1976

Adres: İnönü Üniversitesi Malatya MYO

e-posta: aydan.korkmaz@inonu.edu.tr

Lisans: İnönü Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Maden Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 2001 yılından bu yana İnönü Üniversitesi Malatya Meslek Yüksekokulu Maden Programında Öğretim Görevlisi

Yayın Listesi:

Bildiriler

Aksoğan Korkmaz, A., Özbaş, K.E. (2012). Şırnak asfaltitinin piroliz özelliklerinin karakterizasyonu (syf:143-154). *Türkiye 18. Kömür Kongresi*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 06-08 Haziran, Zonguldak.

Aksoğan Korkmaz, A., Dağdeviren, Ç., Sarıcı Özdemir, Ç. (2014). Elbistan termik santrali uçucu kül karakterizasyonu ve adsorpsiyon uygulamaları (syf:303-308). *Türkiye 19. Kömür Kongresi*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 21-23 Mayıs, Zonguldak.

Aksoğan Korkmaz, A., Bentli, İ. (2013). Kömür karbonizasyonu ve ürünlerinin değerlendirilmesi (syf:140-148). *Malatya ve Çevre İllerinin Maden Sempozyumu*, İnönü Üniversitesi, 27-29 Nisan, Malatya.

Posterler

Sarıcı Özdemir, Ç., Aksoğan Korkmaz, A., Ceylan, Ç. (2015). Elbistan termik santral atığının HCl ve NaOH ile modifikasyonu. *9. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 14-15 Mayıs, İzmir.

Özdemir, E., Eren Sarıcı, D., Aksoğan Korkmaz, A. (2015). Horst ve Bassarear iş indeksi ile kaya parametreleri arasındaki ilişkinin araştırılması. *9. Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 14-15 Mayıs, İzmir.

Aksoğan Korkmaz, A., Bentli, İ., Sis, H. (2015). Malatya-Arguvan linyitlerinin gravite yöntemleriyle zenginleştirilmesi. *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, 13-16 Nisan, Antalya.

Dağdeviren, C., Aksoğan Korkmaz, A., Sarıcı Özdemir, Ç. (2014). Boya adsorpsiyonunda bentonit kilinin kullanılabilirliğinin incelenmesi. *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, 2-5 Eylül, Eskişehir.

Projeler

Elbistan termik santral atıklarından zeolit sentezi ve adsorpsiyon uygulamaları, İnönü Üniversitesi BAP Projesi, 2013-172.