

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ FARKLI KÖMÜRÜN OTOJEN SİKLON VE
SİRAL İLE YIKANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Çağrı ÇERİK

Ekim 2022
İZMİR

İKİ FARKLI KÖMÜRÜN OTOJEN SİKLON VE SPİRAL İLE YIKANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı

Çağrı ÇERİK

Ekim, 2022

İZMİR

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ÇAĞRI ÇERİK, tarafından **PROF. DR. VEDAT ARSLAN** yönetiminde hazırlanan
“**İKİ FARKLI KÖMÜRÜN OTOJEN SİKLON VE SİRAL İLE
YIKANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş,
kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Vedat ARSLAN

Yönetici

Prof.Dr. Mehmet TANRIVERDİ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr. Mümtaz ÇOLAK

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof.Dr. Oktay BAYAT

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Vedat DENİZ

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tüm aşamasında beni yönlendiren ve çalışmalarımda yardımlarını ve bilgisini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Vedat Arslan'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sürecinde tez izleme komitemde bulunup, bilgi birikim ve fikirlerini benimle paylaşan Sayın Prof. Dr. Mehmet TANRIVERDİ ve Sayın Prof. Dr. Mümtaz ÇOLAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Sezai Şen'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca eğitimim ve çalışmalarım sırasında bilgilerinden faydalandığım hocalarıma, doktora süreci boyunca destek olan Araş.Gör. Gökhan Turan'a ve teknik desteklerini esirgemeyen kimya laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Bugüne kadar maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Refika ÇERİK, babam Aziz ÇERİK ve ablam Ayşen ÇERİK'e, çalışmalarım sırasında sabır ve anlayış gösteren, ve her zaman yanımda olan eşim Seda ÇERİK ve varlığıyla hayatımıza neşe katan oğlum Evren ÇERİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çağrı ÇERİK

İKİ FARKLI KÖMÜRÜN OTOJEN SİKLON VE SİRAL İLE YIKANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu çalışmada, Aydın ve Soma bölgesine ait ince boyutlu linyitlerin otojen siklon ve spiral ile zenginleştirilme olanakları araştırılmıştır. Çalışmalarda üç seviye Box-Behnken deney tasarımı ve yüzey yanıt yöntemi ile otojen siklon ve spiralın, tasarım ve işletme parametreleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, kömür külü ve miktarını temsil eden ampirik modeller oluşturmak için kullanılmıştır. Modellerin anlamlılık testi varyans analizi (ANOVA) kullanılarak yapılmıştır.

Deney sonuçları ve modeller incelendiğinde, otojen siklon ile daha düşük küllü kömür elde edilirken, spiral ile daha yüksek küllü kömür elde edilmiştir. Bununla birlikte spiralın temiz kömür kazanım oranı daha fazladır. Aydın kömürü ile yapılan çalışmalarda yüzde 34,84 küllü bir kömür kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kömürün kül oranı yüzde 24,21 ile 32,73 arasında değişirken, temiz kömür kazanım oranı yüzde 56,27 ile 82,68 arasında değişmektedir. Soma bölgesine ait kömürlerde ise yüzde 42,21 küllü bir kömür numunesi kullanılmıştır. Elde edilen temiz kömürün kül oranı yüzde 18,89 ile 32,73 arasında iken temiz kömür miktarı yüzde 39,68 ile 73 arasındadır. Otojen siklon ve spiral beraber kullanıldığında ise elde edilen temiz kömürün verimi, cihazların ayrı ayrı kullanılması göre daha fazladır.

Anahtar kelimeler: Kömür, otojen siklon, spiral, Box-Behnken tasarımı, yüzey yanıt yöntemi

INVESTIGATION OF WASHABILITY OF TWO DIFFERENT COALS WITH WATER-ONLY-CYCLONE AND SPIRAL

ABSTRACT

In this study, beneficiation of Aydın and Soma fine lignites with water-only cyclones (WOC) and spirals were investigated. In the studies, a three-level Box-Behnken design (BBD) of experiments combined with response surface methodology (RSM) used to investigate the effects of the design and operating parameters of water-only cyclone and spiral. The actual data collected from the tests were used to construct the empirical models representing clean coal ash and yield as process responses to the independent variables. The significance test of model fit for clean coal ash and yield were performed using analysis of variance (ANOVA).

Experimental and model results showed that, ash content of the clean coal of WOC was relatively lower, when compared with spiral. However, yield of the clean coal of spiral was higher. A clean coal product containing in between 21.21 – 32.73 percent ash, with a yield of in between 56.27-82.68 percent was produced by the application of WOC and spiral with Aydın coal samples. In the Soma coal samples, the ash content of the clean coal obtained was between 18.89 and 32.73 percent, and the clean coal yield was between 39.68 and 73 percent. When the combination of water-only cyclone and spiral are used, the efficiency of the clean coal obtained is higher than when the devices are used separately.

Keywords: Coal, water-only cyclone, spiral, Box-Behnken design, response surface methodology

İÇİNDEKİLER

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii

BÖLÜM BİR- GİRİŞ..... 1

1.1 Kömürün Tanımı ve Sınıflandırılması	3
1.2 İnce Boyutlu Kömür Zenginleştirme Yöntemleri.....	6
1.2.1 Yüzey Özelliği Farkına Dayalı Yöntemler	6
1.2.1.1 Flotasyon.....	6
1.2.1.2 Yağ Aglomerasyonu	8
1.2.2 Gravite Esaslı Yöntemler.....	8
1.2.2.1 Falcon Konsantratörü	8
1.2.2.2 Knelson Konsantratörü	10
1.2.2.3 Multi Gravity Separator (MGS)	11
1.2.2.4 Kelsey Jigi.....	13
1.2.2.5 Akışkan Yataklı Ayırıcılar	14
1.2.2.6 Otojen Siklonlar	16
1.2.2.7 Spiral	23
1.2.2.8 Otojen Siklon ve Spiral Kombinasyonları	23

BÖLÜM İKİ- MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme	33
2.1.1 Aydın Bölgesi Kömürü Karakterizasyon Çalışmaları	33
2.1.2 Soma Bölgesi Kömürü Karakterizasyon Çalışmaları	36
2.2 Yöntem	38

BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 42

3.1 Aydın Kömürü ile Yapılan Zenginleştirme Çalışmaları	42
3.1.1 Aydın Kömürü Spiral ile Zenginleştirme Deneyleri.....	42
3.1.1.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi.....	46
3.1.1.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	48
3.1.1.3 Besleme hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	49
3.1.2 Aydın Kömürü Otojen Siklon ile Zenginleştirme Deneyleri.....	50
3.1.2.1 Katı oranı ve Besleme Basıncının Etkisi.....	55
3.1.2.2 Katı oranı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi.....	56
3.1.2.3 Besleme Basıncı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi	57
3.1.3 Aydın Kömürü Spiral ve Otojen Siklonun Karşılaştırılması	58
3.2 Soma Kömürü ile Yapılan Zenginleştirme Çalışmaları	59
3.2.1 Soma Kömürü Spiral ile Zenginleştirme Deneyleri	59
3.2.1.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi.....	63
3.2.1.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	65
3.2.1.3 Besleme Hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	66
3.2.2 Soma Kömürü Otojen Siklon ile Zenginleştirme Deneyleri.....	67
3.2.2.1 Katı oranı ve Besleme Basıncının Etkisi.....	71
3.2.2.2 Katı oranı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi.....	73
3.2.2.3 Besleme Basıncı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi	74
3.2.3 Soma Kömürü Otojen Siklon Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi	75
3.2.3.1 Siklon Gövde Uzunluğu ve Üst Çıkış Borusu Dalma Derinliğinin Etkisi	79
3.2.3.2 Siklon Gövde Uzunluğu ve Konik Açının Etkisi.....	81
3.2.3.3 Üst Çıkış Borusu Dalma Derinliği ve Konik Açının Etkisi	82
3.2.4 Soma Kömürü Spiral ve Otojen Siklonun Karşılaştırılması.....	83
3.2.5 Soma Kömürü Otojen Siklon – Spiral Devresi.....	84
3.2.5.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi.....	88
3.2.5.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	90
3.2.5.3 Besleme Hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi	91
3.2.6 Soma Kömürü Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	92

BÖLÜM DÖRT - SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 94

KAYNAKLAR 97



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Tane boyutuna bağlı zenginleştirme yöntemleri.....	2
Şekil 1.2 Kömürleşme süreci ve derecesi	4
Şekil 1.3 Kömürleşme süreci	4
Şekil 1.4 Kömürün karbon oranıyla temas açısı ilişkisi.....	7
Şekil 1.5 Falcon konsantratörü.....	9
Şekil 1.6 Knelson ayırıcısı	11
Şekil 1.7 MGS şematik görünüşü	12
Şekil 1.8 Kelsey jigi şematik görünüşü.....	14
Şekil 1.9 Akışkan yataklı ayırıcı şematik görünüşü.....	15
Şekil 1.10 Akışkan yatak içerisindeki ayırma bölgeleri.....	16
Şekil 1.11 Otojen siklon ve hidrosiklon.....	17
Şekil 1.12 Tricone ayırma bölgeleri.....	18
Şekil 1.13 Spiral konsantratör	23
Şekil 1.14 Spiral konsantratör şematik görünüşü.....	24
Şekil 1.15 Spiralde tanelerin hareketi	24
Şekil 1.16 Kapasiteye bağlı ayırma yoğunluğu(A) ve Ep değeri(B)	25
Şekil 1.17 Ayırıcıların konumu ve ayırma yoğunlukları	26
Şekil 1.18 Spiral devreleri.....	27
Şekil 1.19 Kömür spirali için tane boyutuna bağlı ayırma eğrileri.....	28
Şekil 1.20 Otojen siklonlarda tane boyutuna bağlı ayırma eğrileri.....	28
Şekil 1.21 İki otojen siklondan oluşan kömür zenginleştirme devresi	29
Şekil 1.22 Otojen siklon ve spiral kömür zenginleştirme devresi.....	30
Şekil 1.23 Otojen siklon ve spiral devresinde tanelerin hareketi	31
Şekil 2.1 Aydın kömürü toplamalı elek altı eğrisi	34
Şekil 2.2 Aydın kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları	35
Şekil 2.3 Soma kömürü toplamalı elek altı eğrisi	36
Şekil 2.4 Soma kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları	38
Şekil 2.5 $k=3$, tek merkez noktası olduğunda Box-Behnken tasarımı	39
Şekil 2.6 Deneyler kullanılan otojen siklon	40
Şekil 2.7 Kömür spirali	41

Şekil 3.1 Aydın kömürü spiral ile zenginleştirme sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	44
Şekil 3.2 Aydın kömürü spiral ile zenginleştirme sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	44
Şekil 3.3 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi	47
Şekil 3.4 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi	47
Şekil 3.5 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi	48
Şekil 3.6 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi	49
Şekil 3.7 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi.....	49
Şekil 3.8 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi	50
Şekil 3.9 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	52
Şekil 3.10 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	53
Şekil 3.11 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına etkisi	55
Şekil 3.12 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür miktarına etkisi.....	56
Şekil 3.13 Katı oranı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi.....	56
Şekil 3.14 Katı oranı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi	57
Şekil 3.15 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi.....	57
Şekil 3.16 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi	58
Şekil 3.17 Deney sonuçlarının yüzdürme batırma testi ile karşılaştırılması.....	59
Şekil 3.18 Spiral temiz kömür kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması ..	61
Şekil 3.19 Spiral temiz kömür miktarı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması	61
Şekil 3.20 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi	64
Şekil 3.21 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi	64
Şekil 3.22 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi	65
Şekil 3.23 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi	65
Şekil 3.24 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi.....	66
Şekil 3.25 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi	67
Şekil 3.26 Otojen siklon kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	69
Şekil 3.27 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	69

Şekil 3.28 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına etkisi	72
Şekil 3.29 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür miktarına etkisi.....	72
Şekil 3.30 Katı oranı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi.....	73
Şekil 3.31 Katı oranı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi	73
Şekil 3.32 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi.....	74
Şekil 3.33 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi	75
Şekil 3.34 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	77
Şekil 3.35 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması.....	77
Şekil 3.36 Siklon gövde uzunluğu ve üst çıkış borusu dalma derinliğinin kül oranına etkisi.....	80
Şekil 3.37 Siklon gövde uzunluğu ve üst çıkış borusu dalma derinliğinin temiz kömür miktarına etkisi	80
Şekil 3.38 Siklon gövde uzunluğu ve konik açının kül oranına etkisi	81
Şekil 3.39 Siklon gövde uzunluğu ve konik açının temiz kömür miktarına etkisi	81
Şekil 3.40 Üst çıkış borusu dalma derinliği ve konik açının kül oranına etkisi.....	82
Şekil 3.41 Üst çıkış borusu dalma derinliği ve konik açının temiz kömür miktarına etkisi.....	83
Şekil 3.42 Deney sonuçlarının yüzdürme batırma testi ile karşılaştırılması.....	83
Şekil 3.43 Kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması	86
Şekil 3.44 Temiz kömür miktarı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması	86
Şekil 3.45 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi	89
Şekil 3.46 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi	89
Şekil 3.47 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi	90
Şekil 3.48 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi.....	90
Şekil 3.49 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi.....	91
Şekil 3.50 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi	92
Şekil 3.51 Soma kömürü deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	92

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1 Kömürleşme derecesine göre ASTM sınıflandırması.....	5
Tablo 1.2 Farklı çaplardaki otojen siklonların çalışma şartları.....	19
Tablo 1.3 Siklon çapının tasarım ve işletme parametrelerine oranı.....	20
Tablo 2.1 Aydın kömürü besleme malı tane boyut analizi	33
Tablo 2.2 Aydın kömürü kimyasal analizi (kuru baz)	33
Tablo 2.3 Aydın kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları	34
Tablo 2.4 Soma kömürü besleme malı tane boyut analizi	37
Tablo 2.5 Soma kömürü kimyasal analizi (kuru baz)	37
Tablo 2.6 Soma kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları	37
Tablo 2.7 Otojen siklon boyutları	40
Tablo 3.1 Aydın kömürü spiral için bağımsız değişkenler	42
Tablo 3.2 Aydın kömürü spiral deney sonuçları	43
Tablo 3.3 Aydın kömürü spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri.....	45
Tablo 3.4 Aydın kömürü spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri.....	46
Tablo 3.5 Aydın kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler	51
Tablo 3.6 Aydın kömürü otojen siklon deney sonuçları	51
Tablo 3.7 Aydın kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri...	53
Tablo 3.8 Aydın kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri.....	54
Tablo 3.9 Soma kömürü spiral için bağımsız değişkenler	60
Tablo 3.10 Soma kömürü spiral deney sonuçları.....	60
Tablo 3.11 Soma kömürü spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri.....	62
Tablo 3.12 Soma kömürü spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri	63
Tablo 3.13 Soma kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler	67
Tablo 3.14 Soma kömürü otojen siklon deney sonuçları.....	68
Tablo 3.15 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri..	70
Tablo 3.16 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri.....	71
Tablo 3.17 Soma kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler	75
Tablo 3.18 Soma kömürü otojen siklon deney sonuçları.....	76
Tablo 3.19 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri..	78
Tablo 3.20 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri.....	79

Tablo 3.21 Spiral için bağımsız değişkenler	85
Tablo 3.22 Spiral deney sonuçları.....	85
Tablo 3.23 Spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri.....	87
Tablo 3.24 Spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri	88



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Fosil kaynaklı yakıtlar, yüzlerce yıldır enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu yakıtlar genel olarak kömür, doğalgaz ve petroldür. Petrol ve doğalgaz belirli coğrafi bölgelerde yoğunlaştığından ve doğalgazın depolanması zor olduğundan ülkemizde kömür büyük bir öneme sahiptir.

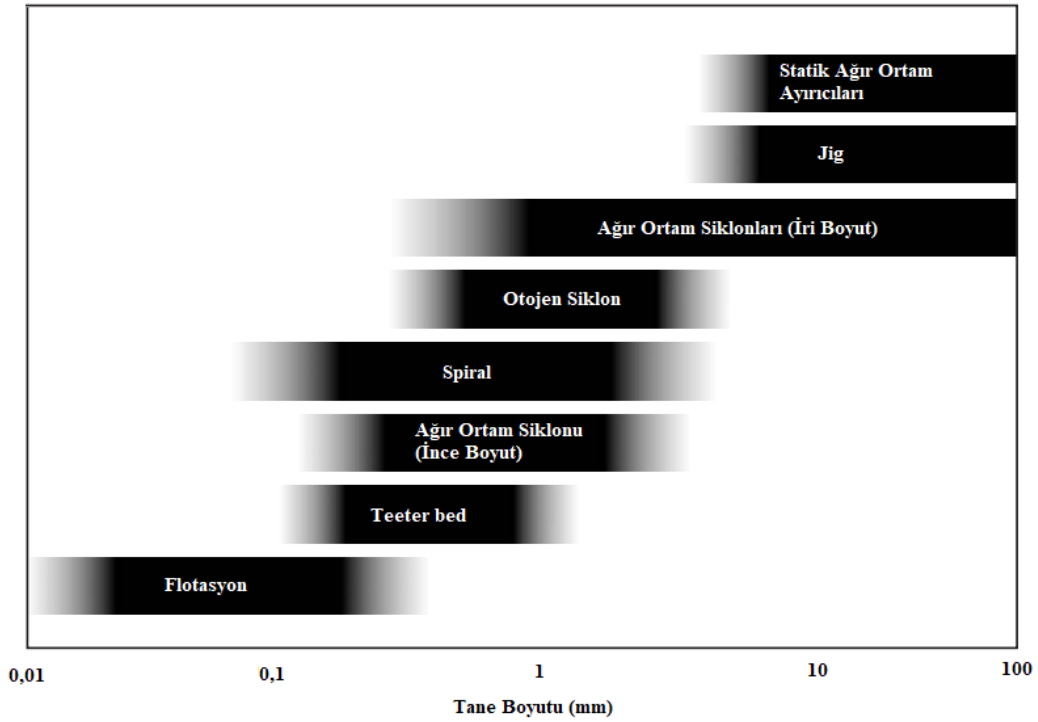
2021 yılı dünya enerji ihtiyacının %82'si fosil kaynaklı yakıtlardan sağlanmıştır. Enerji ihtiyacının artmasıyla kömüre olan talep de artmıştır. Kömür talebinin büyük çoğunluğu Çin ve Hindistan tarafından olmasına rağmen, Avrupa ve Kuzey Amerika ülkelerinde de son 10 yıldır ilk defa artış göstermiştir. Ayrıca kömür, %36'lık payı ile elektrik üretimindeki en çok kullanılan kaynak olmuştur (BP, 2022).

Ülkemizde elektrik üretiminde kömür kullanım oranı %31,43' tür. Elektrik üretiminde kullanılan kömürlerin yaklaşık %52,6'sı ithal kömürlerdir. Yerli kömür kullanım oranının artırılması için elektrik üretimine uygun yerli kömür sahalarının, elektrik üretimi amaçlı projelerle değerlendirilmesi planlanmaktadır (TKİ 2021).

Endüstri ve termik santral kullanımı için, kömürün düşük nem, kül - kükürt değerlerine ve yüksek kaloriye sahip olması gerekmektedir. Yüksek kül oranına sahip kömürlerin termik santrallerde yakıldığında, kazanların ve türbinlerin aşınmasına ve cüruf miktarının artmasına sebep olarak, termik santral verimini önemli ölçüde etkilemektedir (Bhatt, 2006) Kaliteli kömür üretmek için birlikte bulunduğu mineral maddelerin kömür yıkama işlemleri ile uzaklaştırılması gerekmektedir.

Bir kömür yıkama tesisinde tane boyutuna bağlı olarak 2-4 paralel akış vardır. İri boyut için (genellikle +20 mm) statik ağır ortam ayırıcıları veya jigler kullanılmaktadır. Orta boyutta (~20mm -1 mm) ağır ortam siklonları ve kömür ile yantaş arasındaki yoğunluk farkının fazla olduğu bazı durumlarda jigler kullanılmaktadır. İnce boyutta (1-0,15 mm) spiral kullanılırken, çok ince boyutta (-0,2 mm) flotasyonla zenginleştirme yapılmaktadır (Galvin ve Iveson, 2013).

Zenginleştirme boyutlarında alternatif cihazlar ve kömür yıkanabilirliğine bağlı olarak farklı yıkama boyutları da kullanılmaktadır. Örneğin, 2-3 mm ile 0,15 mm tane boyutundaki kömürler için otojen siklonlar, akışkan yataklı ayırıcı (teeter-bed), spiraller veya bu cihazların kombinasyonu kullanılarak zenginleştirme yapılmaktadır (Bethell ve Luttrell, 2004). Sıklıkla kullanılan kömür yıkama yöntemleri Şekil 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1 Tane boyutuna bağlı zenginleştirme yöntemleri (Bethell ve Luttrell, 2004)

Sert linyitlerin jigler veya ağır ortam ayırıcıları ile zenginleştirilmesi, içinde kömür barındıran atık oluşmasına neden olmaktadır. Tesislerdeki bu atıklar çoğunlukla başka bir işleme tabi tutulmadan taş sahasına atılmakta ve bu da ekonomik kayıplara ve çevresel sorunlara yol açmaktadır (Çiçek, Cöcen, Engin ve Cengizler, 2008).

Ülkemizdeki çoğu kömür yıkama tesislerinde ağır ortam ayırıcıları kullanılmaktadır. Bu yöntem ile ince boyutlu kömürler verimli olarak kazanılamamakta ve ağır ortam kayıpları artmaktadır. Bunun başlıca nedenleri, geniş tane aralığında zenginleştirme yapan aygıtlarda ince boyutlarda cihazların hassasiyetin azalmasıdır. Bu nedenle çoğu tesis 0,5 mm altı kömürler yüksek maliyetler ve işletme

zorlukları nedeniyle, düşük verimlilikle zenginleştirilmekte, düşük kalorili ürün olarak satılmakta veya zenginleştirmeden atık barajlarına gönderilmektedir. Bu kömürlerin verimli olarak zenginleştirilmesi, atık sahalarının değerlendirilmesi, ekonomik bir değer elde edilmesi ve enerji üretiminde dışa bağımlılığı azaltması gibi nedenlerden büyük bir önem taşımaktadır.

Bu çalışmada ülkemizde genelde uygulanmakta olan toz kömürün -0,5 mm olarak ayrılıp ya yıkanarak ya da susuzlandırılarak kullanımdan kaynaklanan ürün kayıplarını azaltmak hedeflenmiştir. Bunun yanında toz kömür eleklerinin 1 mm olarak kullanılması ile eleme verimi ve ağır ortam siklonlarındaki performans artışları da hedeflenmiştir.

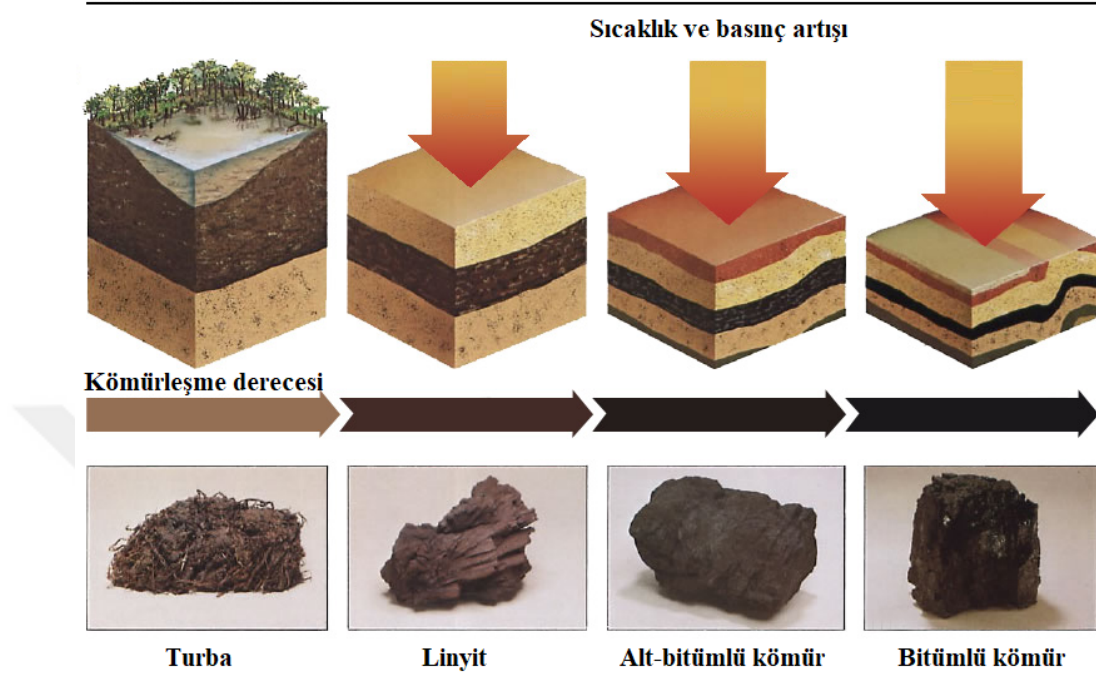
Bu amaç doğrultusunda üzerinde farklı şekillerde araştırmalar yapılmış olan otojen ağır ortam siklonu (water-only cyclone, WOC) ve kömür spirali ile ayrı ayrı ve kombinasyonlu olarak denemeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle otojen ağır ortam siklonunda üzerinde pek fazla araştırma yapılmamış olan bazı parametreler, kömür yıkama performansını iyileştirmek amacıyla, siklon tasarımında ayarlanabilir ve değiştirilebilir şekilde yapılan düzenlemeyle araştırılmıştır.

1.1 Kömürün Tanımı ve Sınıflandırılması

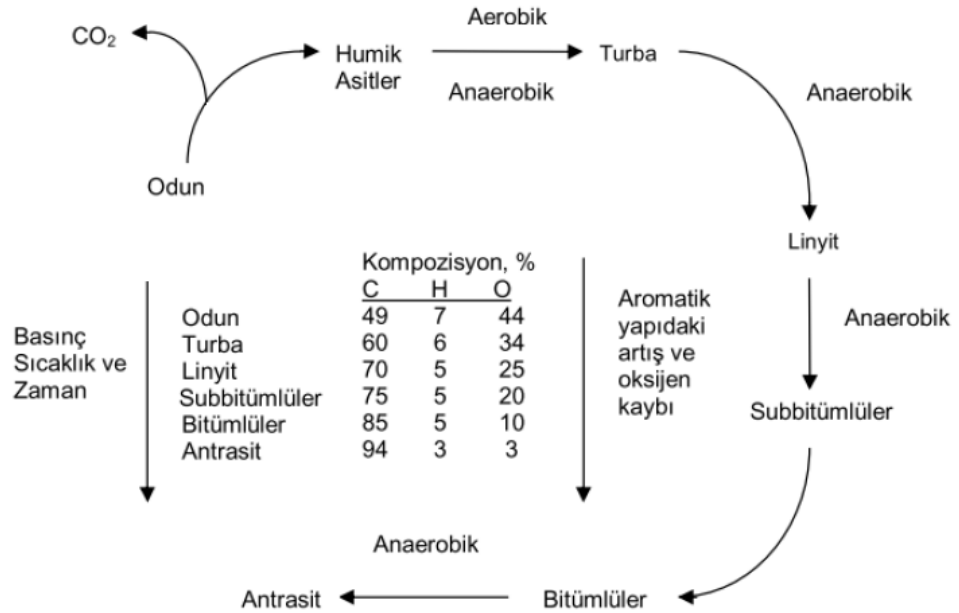
Kömür, bitki ve bitki artıklarının bataklık ortamında çökmesi ve yüksek sıcaklık ve basınç altında kalarak kömürleşmesi sonucunda oluşan tortul bir kayadır (TKİ, 2022).

C,H,O ve belirli oranda S ve N içeren bitki bünyesinden, çeşitli birleşiklerin ayrışması sonucunda farklı kömürler oluşmaktadır. Bitki ve bitki artıkları, uygun bataklık ortamlarında çökmekte ve jeolojik etmenlerle birlikte yeraltına gömülmektedir (Şekil 1.2). Bu organik kütleler ilk olarak basınç şartları sonrasında ise ortamın ısısından etkilenmektedir. Sıcaklık ve basınç etkisi ile organik madde bünyesinde fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Turba aşamasından

taşkömürüne kadar ortamdan sırasıyla su ve su buharı, CO₂, oksijen uzaklaşmakta antrasit aşamasında ise hidrojen bünnyeden ayrılmaktadır (Şekil 1.3)(Önel, 2020).



Şekil 1.2 Kömürleşme süreci ve derecesi (Underground coal,2022)



Şekil 1.3 Kömürleşme süreci (Speight, 2012)

Kömürler, özellikleri bakımından çok farklılık gösterdiklerinden dolayı sınıflandırılması için kullanılabilecek çok fazla değişken vardır. Genellikle sabit karbon, uçucu madde, ısı değeri ve nem oranlarına göre sınıflandırılırlar. Bir çok farklı sınıflandırma sistemi olmasına rağmen günümüzde en çok American Society for Testing and Materials (ASTM) sınıflandırması kullanılmaktadır (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 Kömürleşme derecesine göre ASTM sınıflandırması (Tsai, 1982; Ünalan, 2013; Yaşar,2018)

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

* Kuru külsüz baz ** Orijinal baz

Linyitler orijinal bazda yüksek nem oranları (%30-50) ile karakterize edilebilirler. Yumuşak ve sert linyit olarak ikiye ayrılırlar. Yumuşak linyitler havada kurumaya bırakıldığında dengeye gelene kadar nem kaybederler, bu esnada büzülerek kırılırlar. Su ile temasa geçtiğinde fazla miktarda su alarak şişerler ve dağılırlar. Bu nedenlerle ev yakıtı olarak kullanılmaları mümkün değildir. Genellikle elektrik üretiminde ve sanayi yakıtı olarak kullanılırlar. Oksijeni çok hızlı adsorbe ettiklerinden kendiliğinden yanmaya müsaittir (Rao ve Gouricharan, 2016).

Sert linyitlerin nem oranı yumuşak linyitlere göre daha düşüktür ve daha az parçalanırlar. Bu linyitlerin karbon oranlar ve ısı değerleri, yumuşak linyitlere göre daha yüksektir. Bu nedenle kullanım alanı yumuşak linyitlere göre daha fazladır (Kemal ve Arslan, 1999).

Taşkömürleri, linyitlere göre daha yoğun ve serttir. Nem oranlarının düşük olması ve daha sağlam yapıya sahip olmaları nedeni ile havayla temas ettiklerinde parça büyüklüklerini önemli ölçüde korurlar. Saf kömür bazında %18-36 arasında uçucu maddeye sahip olan taşkömürleri belirli oranda koklaşma özelliğine sahiptirler ve kok üretiminde kullanılmaktadır (Kemal ve Arslan, 1999).

Ülkemizdeki kömürlerin sınıfsal değerlendirilmelerinde, turba, linyit, taşkömürü ve antrasit tanımları daha çok kullanılmaktadır. Bu tanımda linyit sınıfında görülen bazı kömürler (Soma, Tunçbilek vb) ASTM'e göre alt bitümlü kömürler sınıfında görülmektedir.

1.2 İnce Boyutlu Kömür Zenginleştirme Yöntemleri

Tez çalışmasında hedef ince-toz boyut kömürlerin zenginleştirilmesi olduğundan, bu boyutlarda uygulamada ve literatürde yer alan yöntemler irdelenmiştir.

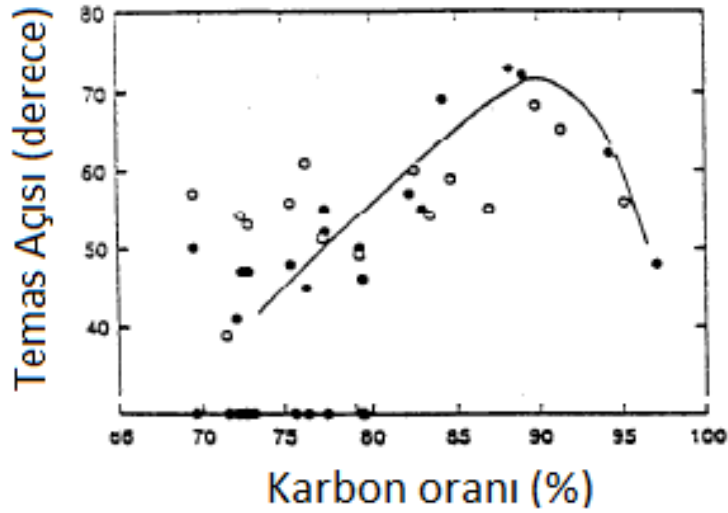
İnce boyutlu kömür yıkama yöntemleri genellikle, yüzey özelliğine göre ve gravite esaslı olarak iki farklı grupta incelenmektedir.

1.2.1 Yüzey Özelliği Farkına Dayalı Yöntemler

1.2.1.1 Flotasyon

Flotasyon, tanelerin yüzey özellikleri farkına dayalı bir yöntemdir ve tane yüzeyinin hidrofob hale getirilip yüzdürülmesi esasına dayanır. Bazı kömürlerde, temiz kömür yüzeyinin doğal hidrofob olması, gang minerallerinden flotasyon ile ayrılmasını kolay hale getirmektedir. Bununla birlikte, kömürleşme derecesine bağlı olarak kömür yüzebilirliği de değişmektedir.

Kömürün temas açısı kömürleşme derecesine göre değişmektedir. En yüksek temas açısı değerleri taş kömürlerinde ölçülmektedir. Şekil 1.4’de karbon oranına bağlı temas açıları verilmiştir. Temas açısı arttıkça kömür tanelerinin yüzmesi daha kolay hale gelmektedir. Kömürleşme derecesi düşük olan linyitlerin flotasyonu, temas açısının az olması, yüzey oksidasyonunun ve bünyesel nemlerinin fazla olması sebebiyle çok zordur. Bu nedenle flotasyon genellikle taş kömürlerinde uygulanmaktadır.



Şekil 1.4 Kömürün karbon oranıyla temas açısı ilişkisi (Arnold ve Aplan, 1989)

Turba, linyit ve bazı alt bitümlü kömürlerin tümü düşük metamorfik derece ile karakterize edilir. Kömürün oluşum dönemlerinde, karbon içeriği artarken oksijen içeriği azalır. Linyit, alt bitümlü kömürler ve bitümlü kömürler gibi farklı derecelerdeki diğer kömürlerle karşılaştırıldığında, antrasit kömürün karbon içeriği en yüksek değere ulaşırken oksijen içeriği en düşük değerdedir. Oksijen kömür bünyesinde, oksijen içeren fonksiyonel grupların birincil formları olarak kömürde bulunur. Düşük dereceli kömürlerde karboksil, fenolik ve karbonil birincil oksijen içeren fonksiyonel gruplardır. Bu oksijen içeren fonksiyonel gruplar, su molekülleriyle hidrojen bağı ile bağlanmakta ve kömürleşme derecesi düşük olan kömür yüzeyinin hidrofobikliğini azaltmaktadır. Bu nedenle, düşük dereceli kömürlerin yaygın yağlı toplayıcılarla yüzdürülmesi zordur (Wen, Xia, ve Sokolovic 2017).

1.2.1.2 Yağ Aglomerasyonu

Yağ aglomerasyonu kömür ve yan kayacın, yüzey özellikleri farkına dayalı bir zenginleştirme yöntemidir. Kömür yüzeyi, kömür ve petrol kökenli yağlara karşı aktifken gang yüzeyi ise, suya karşı daha aktiftir. Kömür ve gangdan oluşan bir süspansiyon içerisine yağ ilave edilerek belirli şartlarda karıştırıldığında, yağ kömür yüzeyine toplanmakta ve gang yüzeyi su ile ıslanmaktadır. Bunun sonucunda kömür taneleri yağ ile toplanıp bir topak oluşturmaktadır. (Kemal ve Arslan, 1999)

Yağ aglomerasyonu işlemi birkaç aşamadan oluşmaktadır;

- Kömürün değirmenlerde öğütülmesi.
- %30-%40 katı oranına sahip pülp hazırlanması ve %1-%2 oranında sisteme mazot eklenerek kondisyonlanması.
- Katı oranının %15-%20'ye düşürülerek hızlı bir karıştırıcıya beslenmesi ve kömür yapısına bağlı olarak ağırlıkça %5-%10 katran yağı ilave edilmesi (Bu aşamada kömür taneleri topaklanmaktadır).
- Bir elek yardımıyla oluşan topakların kazanılması.

Yağ aglomerasyonu, flotasyona göre daha geniş tane boyutları arasında çalışmayı mümkün kılmaktadır ve 100µm altı kömürler için bile uygulanmaktadır. Oluşan topakların boyutlarının iri olması nedeniyle ürünün nem oranı çok daha düşüktür ve susuzlandırılması daha kolaydır. (Rao ve Gouricharan, 2016)

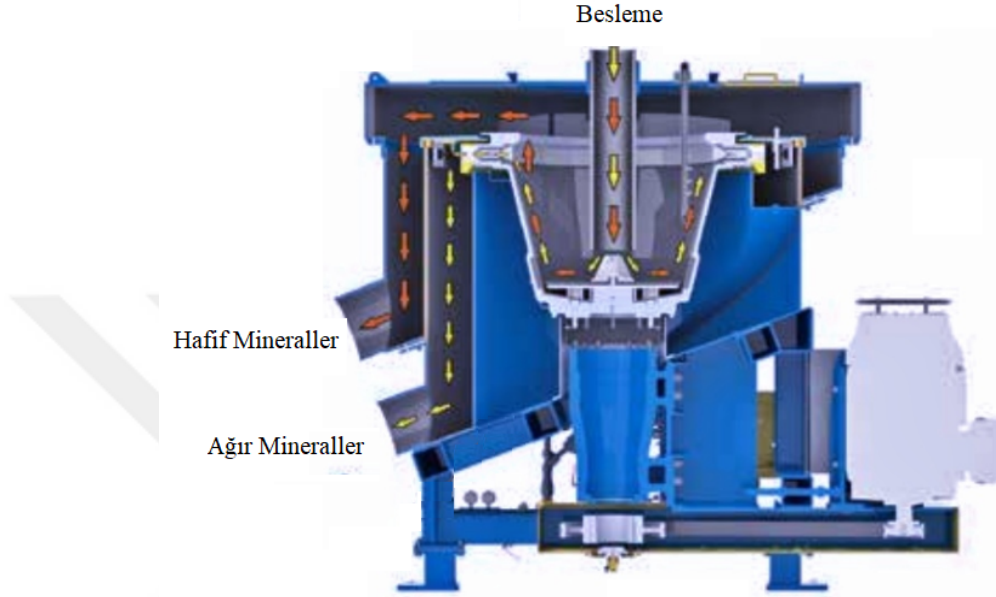
1.2.2 Gravite Esaslı Yöntemler

1.2.2.1 Falcon Konsantratörü

Falcon ayırıcısı, dikey eksen etrafında yüksek hızlarda dönerek santrifüj kuvveti oluşturan ve akışkan film prensibiyle çalışan bir gravite konsantratörüdür. İnce boyutlu altınların kazanılması için üretilmesine rağmen günümüzde kömür zenginleştirmek için de kullanılmaktadır.

Besleme koni dibine doğru yapılır ve yüksek santrifüj kuvveti sebebiyle malzeme koni duvarına doğru savrulmaktadır. Koni duvarında pülp ince bir akışkan film

oluşturarak tanelerin yoğunluğuna göre ayrılmasını sağlar. Koni duvarı dikeyle 10°'lik bir açıya sahiptir ve bu açı sayesinde taneler koninin üst kısmına doğru hareket eder. Koni duvarına yakın ağır mineraller valfler ile dışarı alınırken, hafif mineraller koninin üst kısmından alınmaktadır (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Falcon konsantratörü (<https://www.sgmet.com/product/falcongravityconcentrators>)

Honaker, Singh ve Govindarajan (2000) tarafından yapılan çalışmada -1 mm kömürün zenginleştirilmesi için Falcon cihazında kullanarak deneyler yapılmıştır. Çalışmada ağır ortam süspansiyonunu kullanmanın zenginleştirmeye etkisi incelenmiştir. Deneylerde Illinois bölgesinden, farklı kül oranlarına(%16,88, %17,2, %24,67 ve %32,69) sahip dört farklı numune alınmıştır. Çalışma sonucunda zenginleştirilmesi zor olan kömür numunesi %6,9 küle indirilmiş ve %94 organik verim elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan bütün kömürlerin %90'ın üzerinde organik verimle kazanıldığı belirtilmiştir. Falcon cihazı suyla çalıştırıldığında %7,5 küle sahip konsantre elde edilmiş fakat ağır ortamla çalıştırıldığında kütlegece %20 oranında daha fazla konsantre edilmiştir.

Korkmaz (2021) Sivas-Kangal bölgesine ait linyit numunesi kullanarak Falcon cihazı ile zenginleştirme çalışması yapmıştır. Çalışmada parametre olarak katı oranı, tane boyutu, santrifüj hızı ve besleme hızı denenmiştir. Taguchi deney tasarımı ile

deneyler yapıldıktan sonra optimum şartlar belirlenmiş ve %43,66 kül oranına sahip kömürden %13,68 kül oranına sahip bir konsantre elde etmiştir.

1.2.2.2 Knelson Konsantratörü

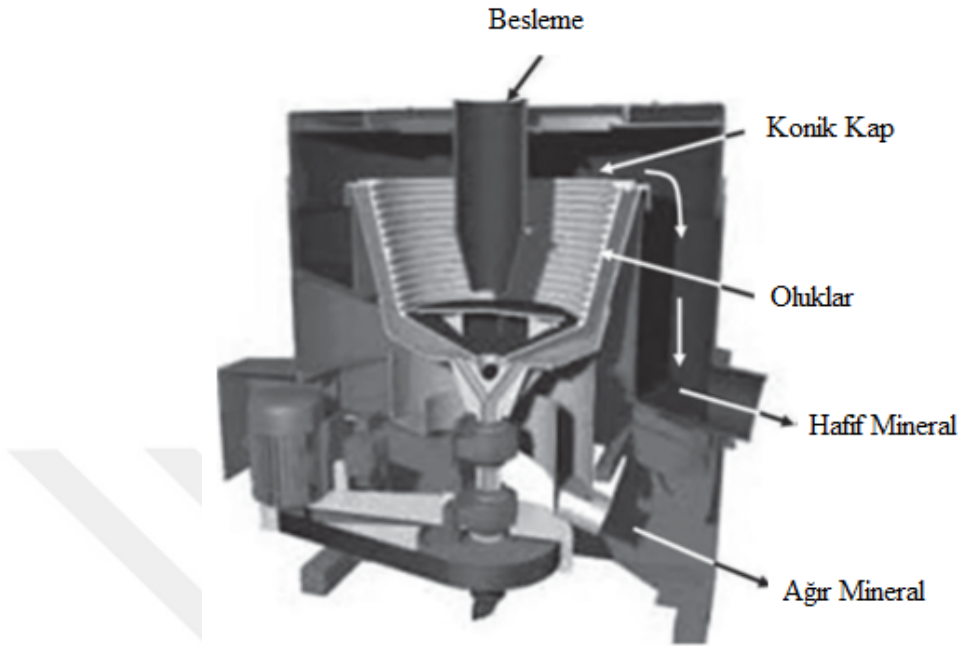
Knelson konsantratörü, santrifüj esaslı çalışmaktadır ve ağır mineralleri kazanmak için engelli çökelme şartlarından yararlanmaktadır. İlk çıktığı yıllarda küçük boyutlu altın zenginleştirme tesislerinde kullanılmasına rağmen günümüzde ince boyutlu kömürlerin kazanılmasında da kullanılmaktadır.

Knelson konsantratörü içerisinde belirli aralıklarla çıkıntılar bulunan konik bir yapıya sahiptir (Şekil 1.6). Bu konik haznenin dönüşüyle tanelere 200 G'ye kadar ulaşabilen bir kuvvet etki eder (Rao ve Gouricharan, 2016).

%70'e varan katı oranına sahip pülp bir boru yardımıyla haznenin tabanına doğru beslenir. Taneler tabana ulaştığında santrifüj kuvvetin etkisiyle koni çeperine doğru itilmektedir. Pülp koni üzerinde bulunan oyuklara dolarak burada bir akışkan yatak oluşturmaktadır. Aynı zamanda bu oyuklardan koni merkezine doğru su verilerek bu akışkan yatağın optimizasyonu sağlanır. Oluşan akışkan yataktan daha ağır olan mineraller aralıklarda kalırken, daha hafif mineraller koninin üst kısmına doğru hareket eder ve koniden taşar. Bu işlem haznelerde ağır mineraller kalana kadar devam etmektedir. Kesikli çalışan modellerde hazne dolduğunda besleme durdurulur içinde kalan ağır mineraller alınır. Sürekli çalışan modellerde ise aralıklara yerleştirilmiş valfler kontrollü olarak açılmakta ve biriken ağır mineraller koniden alınmaktadır.

Özgen, Arsoy, Ersoy. ve Çiftçi (2021) tarafından yapılan çalışmada Koyunağılı lavvar artıklarından kömür kazanım olanakları incelenmiştir. Çalışmada %61,98 kül oranına sahip artık öncelikle 0,5 mm elekten elenerek ön konsantre elde edilmiştir. Sonrasında %71,58 kül oranına sahip malzeme Knelson konsantratörü ile zenginleştirilmiştir. Çalışmada katı oranı, su basıncı ve G kuvveti parametreleri denenmiştir. Deneyler sonucunda %55,89 kül oranına sahip konsantre %67,81 yanabilir verim ile elde edilmiştir. +0,5 mm ön konsantre ve Knelson konsantresi

birleştirilerek %45,61 kül oranına sahip konsantre %81,61 yanabilir verim ile elde edilmiştir.



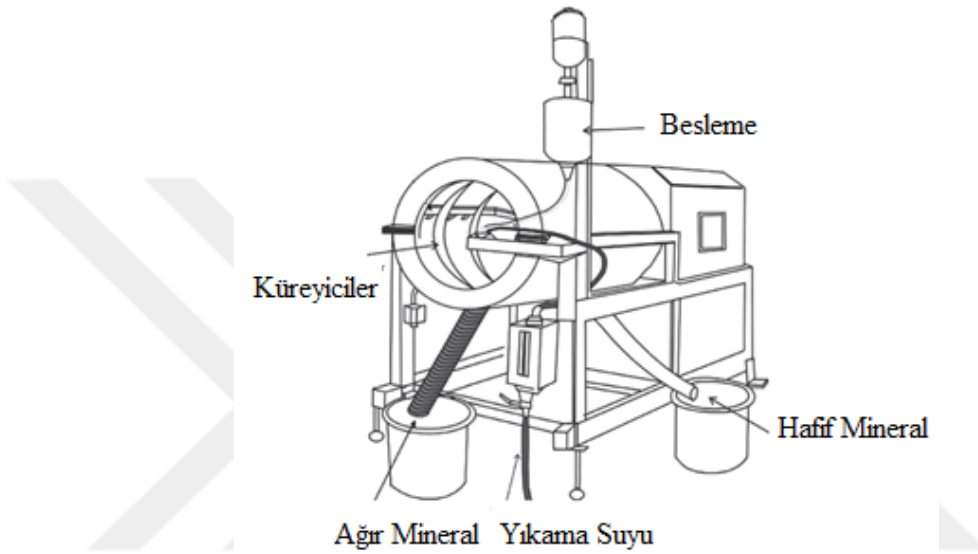
Şekil 1.6 Knelson ayırıcısı (Rao ve Gouricharan, 2016)

Sabah ve Koltka (2014) tarafından yapılan çalışmada %59,08 kül oranına sahip Soma bölgesi lavvar atıkları kullanılmıştır. Malzeme hidrosiklon ile sınıflandırıldıktan sonra %42,60 kül oranına sahip numune knelson konsantratörüne beslenmiştir. Knelson cihazında santrifüj kuvveti ve su basıncı parametreleri test edilmiştir. Deney sonucunda kül oranı %30,51'e düşürülmüş ve %19,50 ayırma verimi elde edilmiştir.

1.2.2.3 Multi Gravity Separator (MGS)

Mozley Gravite Seperatör (MGS), hafif şekilde daralan ucu açık tambur şeklindedir. Bu tamburun yatay ekseninde dönmesiyle, tambur yüzeyinde 5-15 G'lik bir kuvvet oluşturmaktadır ve bu kuvvete ek olarak sinüzoidal yatay bir hareket mevcuttur. Tambur içerisinde sıyrıcılar bulunmakta ve bu sıyrıcılar tambur aynı yönde hareket etmektedir fakat hızları biraz daha fazladır. MGS'nin çalışma şekli, sallantılı masanın yatay ekseninde döndürülmesiyle oluşan bir tambur olarak düşünülebilir ve bu tamburun yüksek hızlarda dönmesiyle santrifüj kuvvetleri oluşmaktadır (Rao ve Gouricharan, 2016)

Besleme, pülp şeklinde tamburun orta noktasına bir boru yardımıyla yapılır ve tamburun açık ucuna daha yakın başka bir boruyla sisteme yıkama suyu verilir. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle ağır taneler tambur yüzeyinde tabaka oluşturur ve bu tabaka küreyicilerle tamburun açık ucuna doğru taşınır. Bu esnada küreyicilerin tersi yönde yıkama suyu verilmektedir. Hafif mineraller ise yıkama suyuyla beraber tamburun arka ucuna doğru hareket etmektedir ( ekil 1.7).



Şekil 1.7 MGS  ematik görünüşü (Rao ve Gouricharan, 2016)

MGS diğ r geli mi  gravite ayırıcılarına göre kıyaslandığında, daha pahalı, mekanik olarak daha karmaşık ve düşük merkezkaç kuvvetine sahip olması nedeniyle kapasitesi daha azdır. Tek  nite MGS saatte 5 ton kapasite ile çalışmakta ve geliştirilen ikiz tamburlarla bu kapasite saatte 25 tona kadar çıkmıştır.

 i ek vd. (2008) tarafından Soma bölgesindeki linyit tesisi atıklarıyla yapılan çalışmada sallantılı masa ve MGS kullanılarak ince boyutlu atıkların yüksek verimle kazanılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada %35,9 kül oranına sahip numune kullanılmıştır. Çalışmada ilk aşamada sallantılı masa ve sonrasında MGS kullanılmıştır. Kömür kazanma verimleri sallantılı masa ile %58,9 ve MGS ile %4,1 olarak bulunmuş ve toplam %63 kömür kazanma verimi ve %79,5 yanabilir verim elde edilmiştir.

Özgen, Malkoç ,Doğancık, Sabah ve Şapçı (2011), Tunçbilek ve Soma yöresine ait kömür zenginleştirme tesisine ait atıkları MGS kullanarak zenginleştirmişlerdir. Besleme malı kül oranları Tunçbilek kömürü için %66,21 ve Soma kömürü için %52,65'dir. Deneylerde katı oranı, tambur hızı, aç, sallantı hızı, yıkama suyu miktarı ve besleme miktarı denenmiştir. Deney sonuçlarına göre, Tunçbilek kömüründen %22,83 kül oranı ve %49,32 verimle, Soma kömüründen ise %22,89 kül oranı ve %60,01 verimle temiz kömür kazanılabileceğini göstermiştir.

1.2.2.4 Kelsey Jigi

Kelsey jigi, Harz jigine benzer bir yapıdadır. Jig dikey eksen etrafında döndürülerek pulsasyon hareketine ek olarak santrifüj kuvveti de sağlanmaktadır.

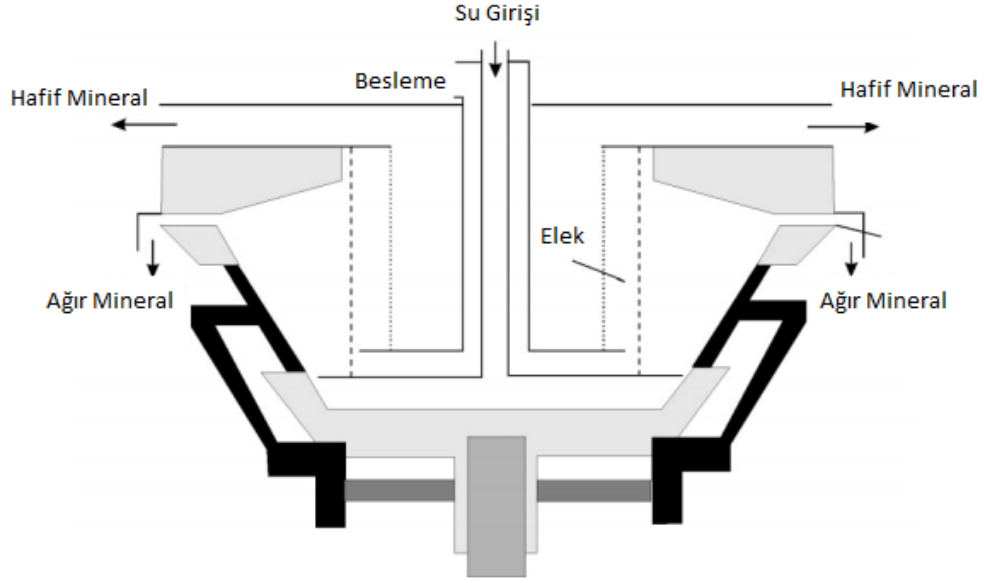
Kelsey jigi dönen bir kabın etrafına sarılmış, bağımsız bir dizi kafesten oluşmaktadır (Şekil 1.8). Bu kafesler pulsasyon suyunu tutar ve kafes çıkışından ağır minerallerin alınmasını sağlar. Kabın içerisinde bir elek ve pülpün dağıtılmasını sağlayan bir mekanizma vardır.

Pülp besleme borusu yardımıyla sisteme verilir ve kabın dönmesiyle oluşan santrifüj kuvveti (60 G'ye kadar) sayesinde taneler suni yatakla temas eder. Suyu verilen yüksek frekanslı pulsasyon ile suni yatak açılır ve kapanır. Bu esnada tanelerin farklı ivmelenmeleri sonucunda malzeme yoğunluğa göre tabakalaşır.

Yüksek yoğunluklu taneler suni yatağın ve eleğin içinden geçerek kafes çıkışından alınırken, düşük yoğunluklu taneler yatağı geçemez ve yatak üzerinden kayarak cihazın üst kısmından çıkmaktadır.

Yerriswany, Majumder, Barnwall, Govindarajan, ve Rao (2003), Moonidih /Hindistan bölgesinden aldıkları %30,97 küllü ve -0,5 mm kömürü Kelsey jigi kullanarak zenginleştirmişlerdir. Deneylerde jig eleği 600µm, katı oranı %25 olarak sabit tutulmuş ve yatak olarak 1,8-0,85 mm arası silika kumu kullanılmıştır.

Zenginleştirme sonucunda temiz kömür kül oranı %17 ve verim %64,64 olarak bulunmuştur.

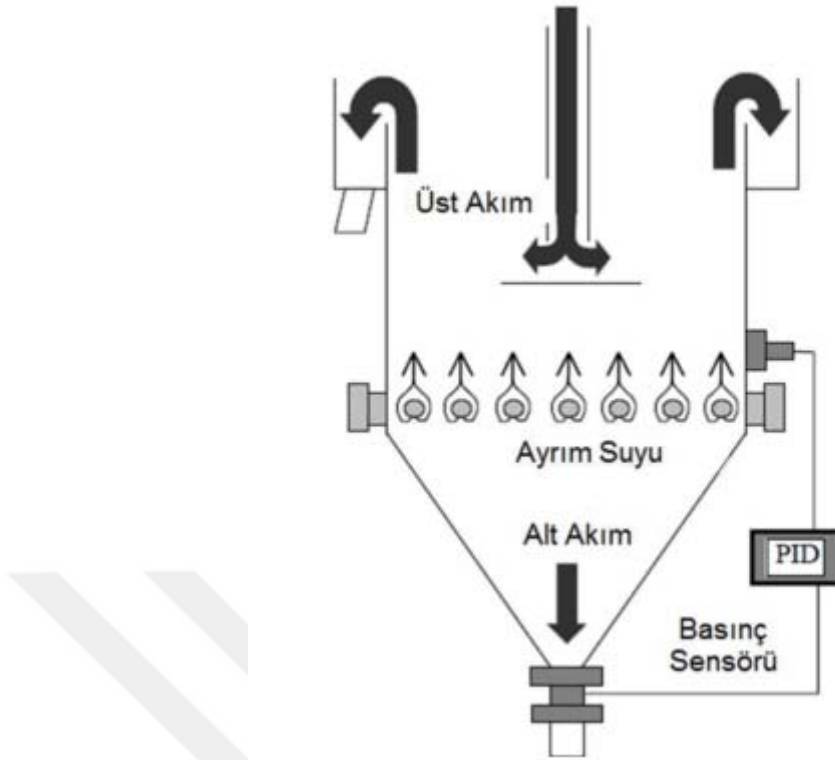


Şekil 1.8 Kelsey jigi şematik görünüşü

Shekhar, Singh ve Chalavadi (2018) tarafından yapılan çalışmada -300 μm %57,3 küllü kömür numunesi ile deneyler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen temiz kömür kül oranı %46,32 ile %55,46 arasında değişmektedir. Bu esnada temiz kömür miktarı ağırlıkça %33,99 ile %75,26 arasında bulunmuştur. Kelsey jigi ile tek aşamada, kül oranında %8'den fazla düşüş sağlanmıştır %53 ağırlıkça verim ile sağlanmıştır.

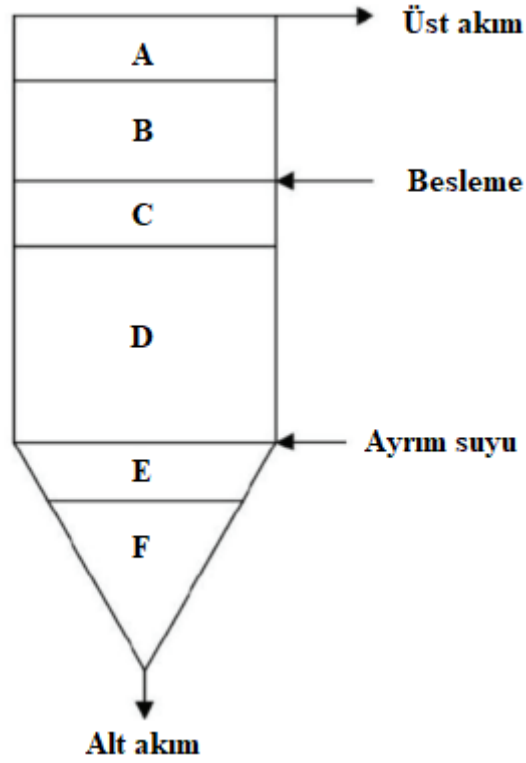
1.2.2.5 Akışkan Yataklı Ayırıcılar

Akışkan yataklı ayırıcılar, beslemenin yukarı doğru eşit şekilde dağılmış bir su veya diğer akışkanlaştırıcı ortam akışına karşı çöktüğü bir kaptır (Şekil 1.9). Tanelerin engelli çökme koşulları ve yerçekimi etkisi altında çökerken yoğunluk ve boyutlarına göre sınıflanırlar. Tipik olarak, bu cihazlar boyut sınıflandırması için kullanılır; bununla birlikte, besleme tane boyut dağılımı kabul edilebilir sınırlar içindeyse, yoğunluk farklılıklarına bağlı olarak tanelerin zenginleştirilmesi için de kullanılabilir.



Şekil 1.9 Akışkan yataklı ayırıcı şematik görünüşü (Kohmuench, Mankosa ve Honaker, 2003)

Akışkan yataklı ayırıcılar altı ana bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 1.10). Bu bölgeler sırasıyla, üst akım toplanma bölgesi (A), üst orta bölge (B), besleme bölgesi (C), alt orta bölge (D), çökeltme bölgesi (E) ve alt akım toplanma bölgesi olarak verilmektedir (F) (Honaker ve Mondal, 1999). Besleme bölgesinde türbülans kaynaklı bir karışma meydana gelmektedir. Alt orta bölümde, akışkan yatak oluşumu gözlenmektedir. Bu bölgede tanelerin yoğunluk ve boyutlarına göre ayrılmasını sağlayan bir ağır ortam oluşmaktadır. Alt orta bölümün hemen altından sisteme verilen yıkama suyu yukarı doğru hareket etmektedir. İnce ve yoğunluğu düşük taneler oluşan ağır ortamı geçemeyerek üst akıma doğru giderken, iri ve yoğunluğu yüksek taneler ise ağır ortam içerisinden geçerek alt konik kısımda yoğun bir yatak oluştururlar. Oluşan bu yoğun yatağın içerisine uygulanan yıkama suyu sayesinde yatak kısmi olarak açılır ve hafif taneler üst akıma doğru yıkanır (Özcan 2017).



Şekil 1.10 Akışkan yatak içerisindeki ayırma bölgeleri (Honaker, ve Mondal, 1999).

Honaker, ve Mondal, (1999) 1-0,15 mm %19,31 kül oranına sahip bir kömürü akışkan yataklı ayırıcı ile zenginleştirme çalışmaları yapmışlardır. Deneylerde besleme hızı, katı oranı, akışkan yatak oluşturan ayırma suyu miktarı ve yatak kalınlığını denemişlerdir. Deney sonucunda %5,9 kül oranı ve %86 yanabilir verimle temiz kömür elde etmişlerdir. Ayırma verimi incelendiğinde ayırma yoğunluğunu d_{50} 1,65 g/cm³ ve E_p değerini 0,17 olarak bulmuşlardır.

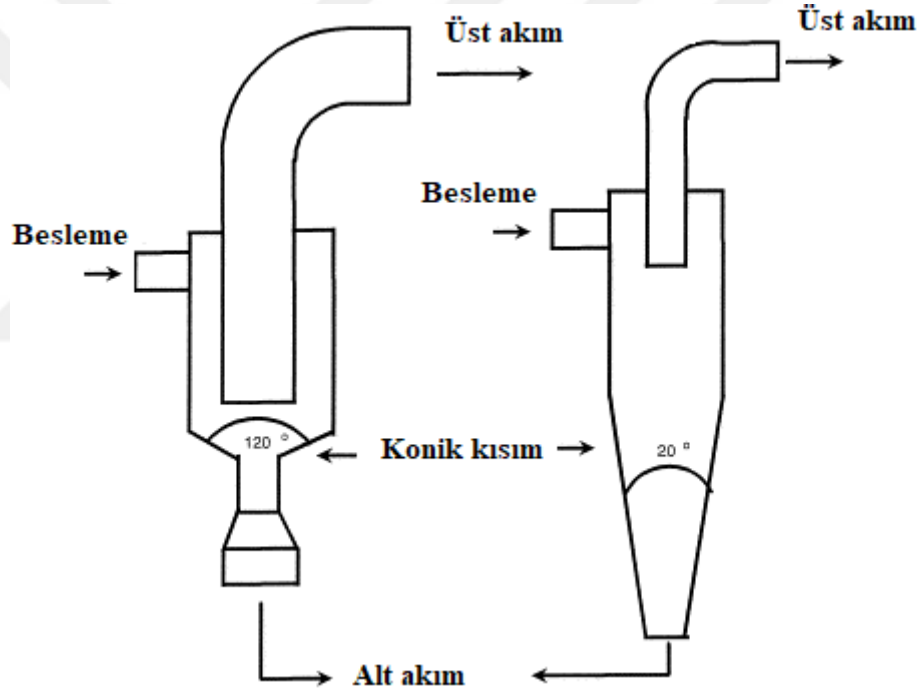
1.2.2.6 Otojen Siklonlar

Bilinen hidrosiklonların, silindirik ve konik kısmına özel bir şekil vererek yoğunluğa dayalı ayırma yapmak mümkündür. Bu cihazlarda ağır ortam kullanmadan sadece su ile ayırma ortamı oluşturulmaktadır ve bu siklonlar su siklonları olarak tanımlanmaktadır.

Su siklonları silindirik gövdeye bağlı teğetsel bir besleme borusu sahiptir ve alt taraftaki konik kısmın açısı 80° ile 140° arasındadır. Normal siklonlara göre daha uzun

olan üst çıkış borusu bulunmaktadır ve bu nedenle alt çıkış ile üst çıkış borusu arasında daha kısa bir boşluk vardır (Şekil 1.11).

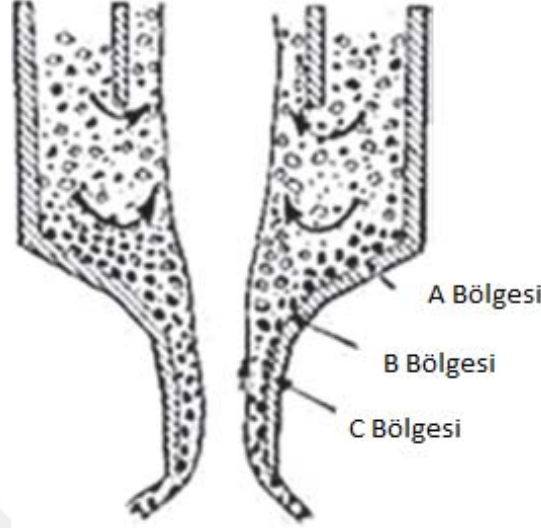
Besleme basınçlı olarak teğetsel borudan siklona gönderildiğinde, pülp silindirik gövde boyunca helezonik olarak ilerler. Bu esnada ağır mineraller dışa ve hafif mineraller içe doğru yönelir. Ağır mineraller alt taraftaki konik kısma geldiğinde hızları birden düşer ve bu bölgede yoğunlaşmasına sebep olur. Böylece konik kısımda otojen ortam olarak da adlandırılan bir ağır ortam bölgesi oluşur. Bu ağır ortamdan geçen ağır mineraller alt kısımdan giderken, geçemeyen hafif mineraller üst çıkışa doğru gitmektedir. Böylece tane boyutu yerine yoğunluğa göre ayırım yapılmış olur.



Şekil 1.11 Otojen siklon ve hidrosiklon (Patil, Bhaskar, Jakhu, ve Rao, 1997)

Tricone siklonunda ayırım üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 1.12). İlk aşamada, yüksek yoğunlukta ve iri olan tanelere daha fazla merkezkaç kuvveti etki edecek ve bu taneler A bölgesinde bir yatak oluşturacaklardır. Hafif mineraller bu bölgedeki yatağın içinden geçemeyeceği için yatağın üstünden kayarak B bölgesine geçmektedir. B bölgesindeki taneler akım kuvvetine daha fazla maruz kalmaktadır. Bu nedenle yatağın üst kısmı sıyrılarak merkezi akıma kapılacaklardır. Son olarak merkezi akımdan kurtulan ince taneler ve yatağın geri kalanı C bölgesine taşınacaktır.

Bu bölgede koniklik açısı daraldığı için ince taneler akımla taşınacaktır. Böylece geriye kalan iri ve ağır taneler alt çıkıştan alınmaktadır.



Şekil 1.12 Tricone ayırma bölgeleri (Rao ve Gouricharan, 2016)

Üst çıkış borusu dalma derinliği, otojen siklonlar için en önemli değişkenlerden biridir. Bu uzunluk az tutulduğunda ince boyutlu taneler yoğunluklarından bağımsız olarak üst akıma gitmektedir. Bu durumda kömür kazanım oranı artarken kül oranı da artmaktadır. Dalma derinliği arttırıldığında ise, düşük küllü kömür elde edilmektedir. Bu uzunluk genel olarak siklon uzunluğunun 2/3 katı olarak alınmaktadır.

Üst çıkış çapı, genelde siklon çapının 0,4-0,6 katı arasındadır. Geniş çıkış çapları, üst akıma giden malzeme miktarını arttırmakta ve kömür kalitesini düşürmektedir. Çıkış çapı daraltıldığında ise, kömür kazanım oranı düşmektedir.

Konik açı, ayırma yoğunluğunu önemli bir şekilde etkileyen parametredir. Bu açının 80°'den az olmaması istenmektedir. Açı küçüldükçe siklon, tane boyutuna göre ayırım yapmaya başlamaktadır ve engelli çökelme şartlarının sağlanabilmesi için bu açının 80°-140° arasında olması gerekmektedir. Açı 80°'den 140°'ye doğru artarken ayırma yoğunluğu da buna paralel olarak artmaktadır. (Majumder ve Barnwal, 2011)

Siklon çapı, beslenecek malzeme boyutu ve kapasite açısından önemlidir. Siklon çapının beslenecek malzemenin 10-20 katı olması gerekmektedir. Siklon çapı arttıkça

kapasite artmaktadır fakat siklon içindeki sürüklenme kuvvetleri de artmaktadır. Bu nedenle ince boyutlu malzemeler yüksek siklon çaplarında verimli olarak ayırlanamamaktadır. Farklı siklon çapları ve buna bağlı çalışma şartları Tablo 1.2’de gösterilmiştir.

Tablo 1.2 Farklı çaplardaki otojen siklonların çalışma şartları (Honaker, Kohmuench ve Luttrell, 2013)

Siklon Çapı (mm)	Besleme Boyutu (mm)	En ince Tane Boyutu (mm)	Katı Miktarı (t/h)	Pülp Miktarı (m ³ /saat)	Katı Oranı (%)
254	2	0,15	3,6 - 7,3	43 - 59	10
381	6,35	0,2	10,9 - 22,7	116 - 163	12
508	12,7	0,3	31,8 - 54,5	249 - 340	15
660	19,05	0,5	45,5 - 81,8	338 - 499	20

Besleme borusu ve alt çıkış çapları, besleme boru çapı arttıkça kapasite artmakta fakat tanelerin siklon içinde kalma süresini azaltmaktadır. Bu nedenle ayırma verimini düşürmektedir. Alt çıkış çapı arttıkça, alt çıkışa giden malzeme miktarını arttırmakta ve ayırma yoğunluğunu düşürmekte fakat ayırma verimini olumsuz yönde etkilemektedir.

Besleme basıncı, basınç az olduğunda girdap akımı oluşmayacak ve verimli bir ayırma gerçekleşmeyecektir. Besleme basıncı arttığında ise, tanelerin siklon içerisinde kalma zamanı azalmakta ve kapasite artmaktadır fakat ayırma verimi ve kömür kazanma oranı düşmektedir. İnce boyutlu malzemelerde, iri malzemelere oranla daha yüksek basınçla çalışmak gerekmektedir. Besleme basıncı siklon çapına göre farklılık göstermektedir.

Katı oranı, ürün kalitesini etkilemektedir. Engelli çökelme şartları ve buna bağlı olarak otojen ortam üretmek için katı oranı önemli bir parametredir. Katı oranı arttıkça ayırma yoğunluğu yükselmekte ve ayırma verimi biraz azalmaktadır. Bu nedenle

otojen siklonlar, siklon çapı ve tane boyutuna bağlı olarak genelde %10-%20 katı oranında çalışmaktadır.

Otojen siklonların, çalışma parametreleri ve beslenecek tane boyutu siklon çapına bağlıdır. Bu durumda siklon çapı “D” olarak alındığında bu parametreler genel olarak Tablo 1.3’de belirtilen değerler kullanılabilir. (Rao ve Gouricharan, 2016)

Tablo 1.3 Siklon çapının tasarım ve işletme parametrelerine oranı

En iri tane boyutu	D/10
Önerilen tane boyutu	D/20
Üst çıkış çapı	D/2
Üst çıkış boru uzunluğu	7D/4
Alt çıkış çapı	D/4

H. Hacifazlioglu (2012a), yaptığı çalışmada 1-0,2 mm arası taş kömürü ile yaptığı deneylerde, otojen siklonların üst çıkış çapı, alt çıkış çapı ve siklon çapının zenginleştirmeye etkisini araştırmıştır. Alınan sonuçlara göre siklon çapının artmasıyla temiz kömürdeki kül oranı artmıştır. Bu artışın nedeninin, siklon çapının artmasıyla siklon içerisindeki hızın düşmesi ve zenginleştirmeyi olumsuz olarak etkilediği belirtilmiştir. Üst çıkış çapı değiştirildiğinde ise, çapın artmasıyla daha fazla ürünün buradan çıktığı belirtilmiş ve bu nedenle temiz kömür kazanım oranı artmış fakat kül oranı da aynı oranda artmıştır. Alt çıkış çapı arttırıldığında, malzemelerin çoğunun buraya yöneldiği ve üst çıkıştan düşük küllü kömürün daha az kömür kazanma verimiyle elde edildiği belirtilmiştir. Otojen siklonla yapılan deney sonuçlarına göre en iyi sonuçlarla, spiral ve flotasyon devrelerinin karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçlara göre otojen siklonların daha düşük küllü kömür ürettiği fakat kömür kazanma veriminin çok yüksek olmadığı belirtilmiştir. Otojen siklonların yüksek verimle nihai ürün elde edemediği ve tek kademeli zenginleştirme devreleri için uygun olmadığını söylemiştir.

Kalyani, Charan, Halidar, Sinha ve Suresh (2008), tarafından yapılan çalışmada, 3-0,075 mm arası taş kömürünün otojen siklonlarla zenginleştirilmesi incelenmiştir.

Siklon uzunluğu ve katı oranının zenginleştirmeye etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde üç çıkış ve alt çıkış çapı sabit tutulurken siklon uzunluğu değiştirilmiş ve siklon uzunluğunun artmasıyla temiz kömür oranının arttığı gözlemlenmiştir. Siklon uzunluğunun artmasıyla, engelli çökelme şartlarının daha geniş bir yerde oluşmasına ve siklonda daha kalın bir yatak oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle yüksek ayırma yoğunluklarına ulaşılmış ve kömür kazanım oranını arttırmıştır. Katı oranı arttırıldığında ise ayırma yoğunluğu yükselmiş ve üç çıkışa giden malzeme miktarını arttırmıştır. Ancak bu işlemde yüksek yoğunluklu kül fraksiyonlarıda üç çıkışa giderek temiz kömürde kül oranı artışına sebep olmuştur.

Abbas ve Muhammad (2016), otojen siklonların çalışma ve tasarım parametreleri üzerine yaptıkları çalışmada 2-0,25 mm arası numune ile çalışmışlardır. %30 kül oranına sahip bir kömürden %15 kül oranına sahip temiz kömür %88 kazanım oranı ile elde edilmiştir. Çalışma parametresi olarak siklon eğimi, besleme basıncı ve katı oranı seçilirken, tasarım parametreleri ise üç çıkış çapı, dalma derinliği ve alt çıkış çapı olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde siklon alt çıkış çapının ve siklon eğiminin arttırılmasıyla kömür külü ve kömür kazanım oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Besleme basıncı, üç çıkış çapı, katı oranı ve üç çıkış borusu dalma derinliği artırıldığında ise kömür külü ve kömür kazanım oranının arttığı gözlemlenmiştir.

Hacifazlioglu (2012), otojen siklonun çalışma parametrelerinin optimizasyonu hakkında yaptığı çalışmada taş kömürü kullanmıştır. Bu çalışmada siklon eğimi, besleme basıncı ve katı oranının, temiz kömür külü ve miktarına etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre siklon eğimi arttığında, temiz kömürün kül oranı ve kömür kazanma veriminin düştüğü görölmektedir. Bunun nedeni, siklon dik konuma geldiğinde sadece hafif tanelerin yerçekimi kuvvetini yenerek üç çıkışa yönelmesi ile açıklanmıştır. Besleme basıncı arttırıldığında, temiz kömür oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebi, tanelerin siklon içerisinde ayırma için gerekli sürede kalmadığı ve böylece alt çıkışa doğru yönelmesi olarak belirtilmiştir. Katı oranı arttırıldığında ise, siklon içindeki otojen ortam yoğunluğunun yükseldiği ve böylece üç çıkışa daha fazla malzeme gittiği ifade edilmiştir.

Majumder ve Barnwal (2010), otojen siklonda 0,5 mm kömür zenginleştirme olanaklarını incelemişlerdir. Çalışmada otojen siklonun konik kısmın açısı, üst çıkış çapı ve üst çıkış borusu dalma derinliğinin kömür zenginleştirme üzerine etkileri araştırılmıştır. İstatistiksel bir deney tasarımı kullanılarak, bireysel değişkenlerin etkileri ve değişkenler arasındaki etkileşimlerin etkilerinin anlaşılması sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, konik kısmın açısı, üst çıkış çapı ve dalma derinliği tanelerin siklonda kalma sürelerini direkt olarak etkilemektedir. Bu nedenle zenginleştirme için önemli olduğu belirtilmiştir. Bu parametrelerden, en önemli olanı ise üst çıkış çapı olarak ifade edilmiştir. Ayrıca 0,075 mm tanelerin yoğunluğa bağlı olarak ayrılma hızı üst çıkışa yöneldiği gözlemlenmiştir.

Sun, Wei ve Cui (2016), otojen siklonda farklı tane boyutlarında çalışmalar yapmışlardır. Deneylerde 3-0,18 mm, 3-0,125 mm, 3-0,098mm ve 3-0,074mm arası kömür numuneleri kullanmışlar ve E_p değerine etkisini gözlemlemişlerdir. Tane boyutu azaldıkça ayırma yoğunluğu ve E_p değerinin arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca otojen siklonların, ağır ortam siklonları kadar verimli çalışmadığı fakat otojen siklonların daha basit ve ucuz olduğu belirtilmiştir.

Maharana ve Suresh (2020), yaptıkları çalışmada %28,73 küllü bir kömür numunesi kullanarak otojen siklonda zenginleştirme olanaklarını incelemişlerdir. Çalışmada farklı üst çıkış ve alt çıkış çaplarını deneyerek kül oranı ve temiz kömür miktarını incelemişlerdir. Optimizasyon sonucunda yapılan deneyde %23.04 kül oranına sahip temiz kömür, %76,63 ağırlık oranıyla elde edilmiştir.

Hembrom ve Suresh (2018) tarafından yapılan çalışmada %37,84 kül oranına sahip bir kömür kullanılmıştır. Otojen siklonun alt çıkış çapı, üst çıkış borusu uzunluğu ve çapı olmak üzere üç farklı parametre denenmiştir. Bu kömürden %18,54 kül oranına sahip temiz kömür %29,20 ağırlık oranıyla elde edilmiştir. Ayrıca temiz kömür miktarı ve kül oranı için en etkili parametrenin üst çıkış borusu uzunluğu olduğunu belirtmişlerdir.

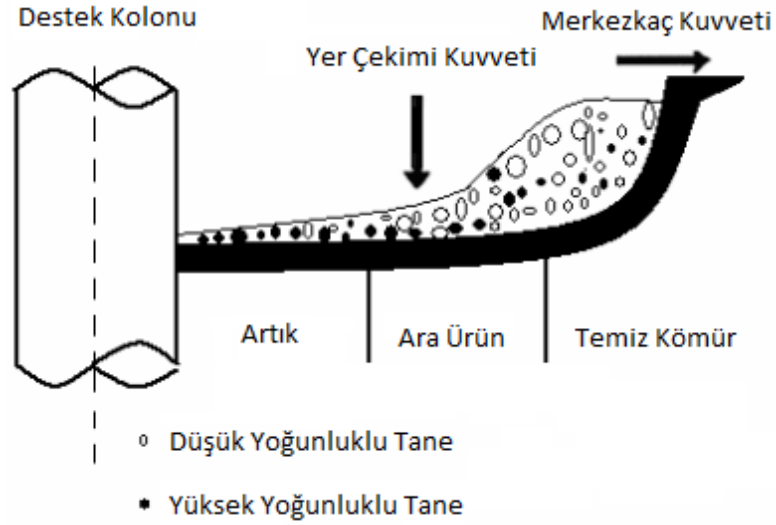
1.2.2.7 Spiral

Spiral konsantratör, destek kolonu etrafında sarılmış ve 5-6 spiral dönüşünden oluşan helezonik bir yapıya sahiptir(Şekil 1.13). Spirallerde taneler, boyutlarına, yoğunluklarına ve şekillerine göre ayrılmaktadır. Spirallerde genellikle $-3+0,1$ mm arasında taneler zenginleştirilmektedir ve %15-%40 arası katı oranına sahip pülp spiral tepesinden beslenmektedir.

Spiral yüzeyine yakın hareket eden su sürtünme nedeniyle yavaşlar ve daha az merkezkaç kuvvetine maruz kalır. Böylece bu bölgedeki su spiral merkezine doğru hareket eder ve bu hareket esnasında ağır mineralleri de taşımaktadır. Bu sırada daha hızlı akan suyun üst kısmı, dışarıya doğru hareket eder ve hafif taneleri de beraberinde taşır. (Şekil 1.14)

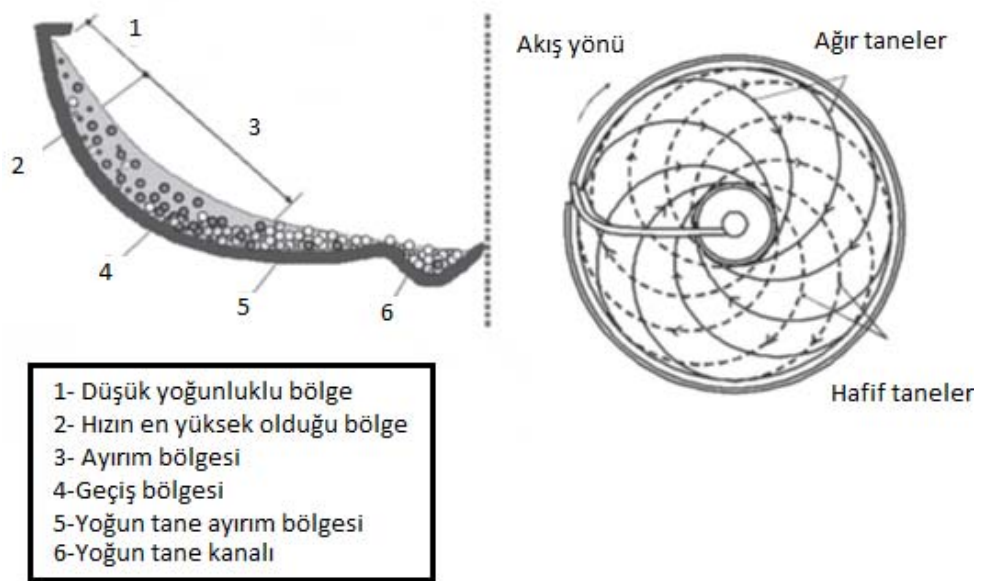


Şekil 1.13 Spiral konsantratör



Şekil 1.14 Spiral konsantratör şematik görünüşü (Das vd., 2007)

Spiral konsantratörün helezonik şekli, akışkan film tabakasının oluşmasına ve aynı zamanda yatay düzlemde merkezkaç kuvveti etkisi oluşmasına sebep olur. Merkezkaç kuvvetindeki farklar sonucunda akış üzerinde kesitsel bir yer değiştirme meydana gelir. Suyun üst kısımları dışarı doğru hareket eder ve sonrasında spiral yüzeyine yakın olan akıma doğru iner. Akışın bu kesitsel hareketi, ağır taneleri merkeze doğru kaydırırken, hafif ve yavaş çökelen taneleri dışarı doğru iter (Şekil 1.15). Pülp içerisindeki ağır ve hafif taneler böylece zıt yönlerde gider ve birbirlerinden ayrılırlar (Rao ve Gouricharan, 2016).

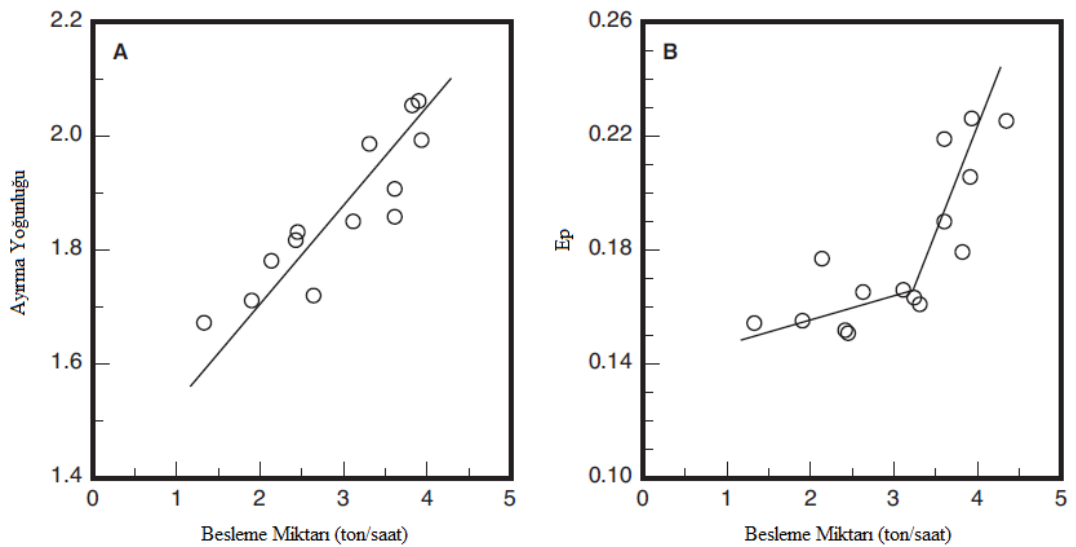


Şekil 1.15 Spiralde tanelerin hareketi (Rao ve Gouricharan, 2016)

Kömür spiralleri, bakımlarının kolay olması, reaktif ve ağır ortam ihtiyacı olmadan, yatırım ve işletme maliyetlerinin düşük olması nedeniyle kömür yıkama tesislerinde her geçen gün daha çok kullanılmaktadır.

Beslenen katı miktarı arttıkça spiral kapasitesi artmasına rağmen ayırma yoğunluğu artmakta ve ayırma verimi düşmektedir. Kömür zenginleştirme tesislerinde maliyeti düşürmek için az spiral kullanılmakta veya tasarlanan kapasite aşıldığından genelde bu tesisler yüksek E_p değeri ve ayırma yoğunluklarıyla çalışmaktadırlar. Şekil 1.16'da kapasiteye bağlı E_p değeri ve ayırma yoğunluğu eğrileri gösterilmiştir. (Luttrell, Honaker, Bethell ve Stanley, 2007)

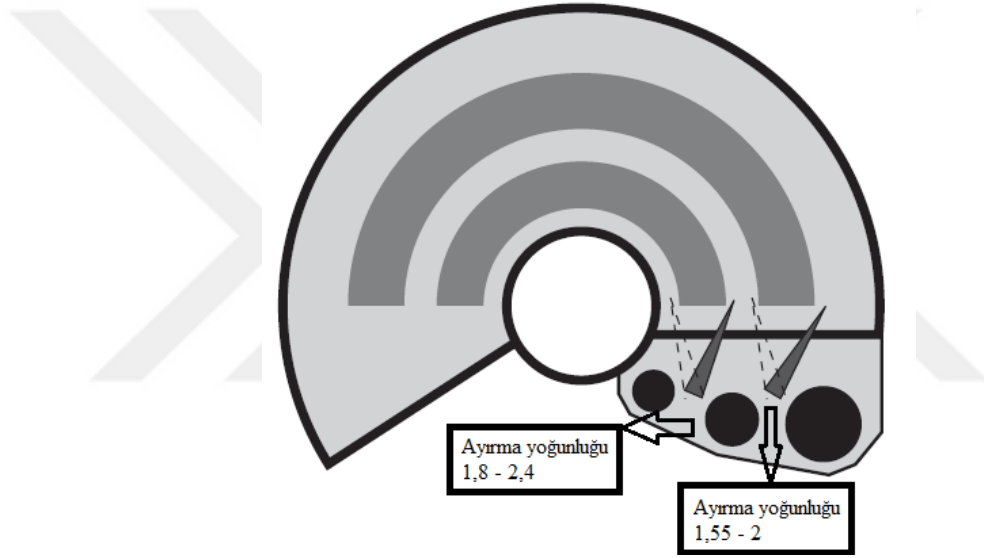
Pülp akış oranı; spirallerin düzgün bir şekilde ayırım yapabilmesi için yeterli ve sabit bir akış gereklidir. Katı miktarı sabit tutulup, akış miktarı düşürüldüğünde katı oranı artmaktadır. Bu durumda ayırma yoğunluğu ve kömür kazanımı düşmekte, kömür külü ise artmaktadır. İri boyutlu tanelerde, ince boyutlu tanelere oranla daha fazla akış oranı istenmektedir. Akışın az olması ağır tanelerin yeterli hareket etmesini önleyerek birikmelere yol açabilmektedir. Akış fazla olduğunda ise, yüksek kuvvetler sebebiyle ağır taneler temiz kömüre karışıp kömür külü arttırmaktadır. Bu nedenle kömür spirallerinde genellikle %25-%35 katı orasında çalışılmaktadır (Luttrell vd., 2007).



Şekil 1.16 Kapasiteye bağlı ayırma yoğunluğu(A) ve E_p değeri(B)

Ayırıcı bıçaklar, spiral üzerinde akan malzemeleri artık, ara ürün ve temiz kömür olarak ayırmaktadır. Bu bıçakların konumu ayırma yoğunluğu açısından önemlidir. Ayırıcılar siklon merkezine yakın konumlandırıldığında ayırma yoğunluğu artmakta, tersinde ise azalmaktadır. Şekil 1.17’de ayırıcıların konumu ve buna bağlı ayırma yoğunlukları verilmiştir.

Tane boyutu, arttıkça tanelerin büyük bir kısmı yoğunluğundan bağımsız olarak atığa gitmektedir. Tane boyutu düşük olduğunda ise, ince tanelerin hepsi su akışıyla taşınarak temiz kömüre karışmaktadır. Bu nedenle kömür yıkama tesislerinde genelde spiraller 1-0,15 mm tane boyutunda çalıştırılmaktadır.



Şekil 1.17 Ayırıcıların konumu ve ayırma yoğunlukları (Luttrell vd., 2007)

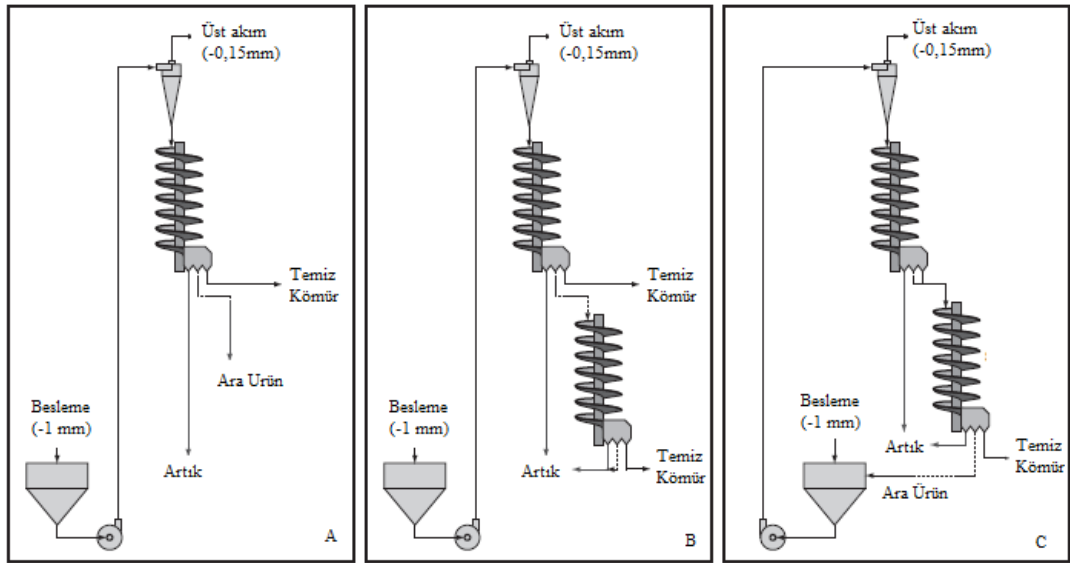
Ye vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, 1,5-0,5 mm tane boyutunda %22,13 kül oranına sahip bir kömür numunesi kullanmışlardır. Çalışmada katı oranı ve besleme hızının Ep değerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde katı oranı ve besleme hızı arttıkça Ep değerinin arttığı gözlenmiştir.

1.2.2.8 Otojen Siklon ve Spiral Kombinasyonları

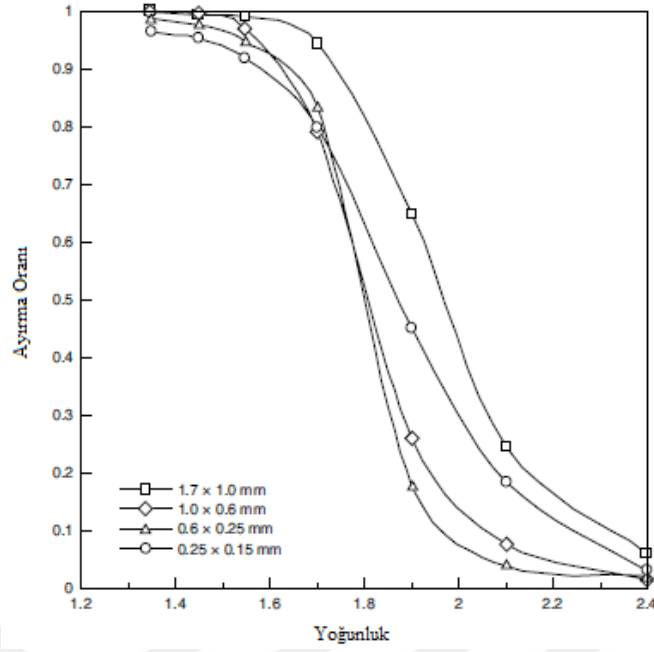
Spiraller, 1-0,15mm arası kömür zenginleştirme için en iyi ayırma yöntemlerinden biri olmasına rağmen ayırma yoğunlukları ağır ortam ayırıcılarına göre daha yüksek ve verimleri daha düşüktür. Tek kademeli spiral devrelerindeki ara üründe,

serbestleşmemiş taneler ile yanlış yöne giden taş ve kömür taneleri bulunmaktadır. Bu devrelerde ara ürün, temiz kömürle birleştirilerek verim arttırılabilir veya artıkla birleştirilerek düşük küllü kömür elde edilebilir. Bu nedenle spiral devreleri, genellikle iki spiralden oluşmakta ve ikinci spirale sadece ara ürün veya ara ürün ile birlikte temiz kömür beslenerek tekrar zenginleştirilmektedir.

Ara ürün ikinci spirale beslendiğinde, ayırma verimi artmaktadır fakat aynı zamanda ayırma yoğunluğu yükseldiği için temiz kömür külü de artmaktadır. Bu sorun ikinci spirale, ara ürün ve temiz kömürün beraber beslenerek ikinci spiral ara ürünün tekrar besleme malıyla birleştirilmesi ile çözülebilir (Şekil 1.18). Bu durumda ise, çok fazla spiral ihtiyacı olacağından pratik olarak uygulanabilir bir yöntem değildir. (Luttrell vd., 2007)

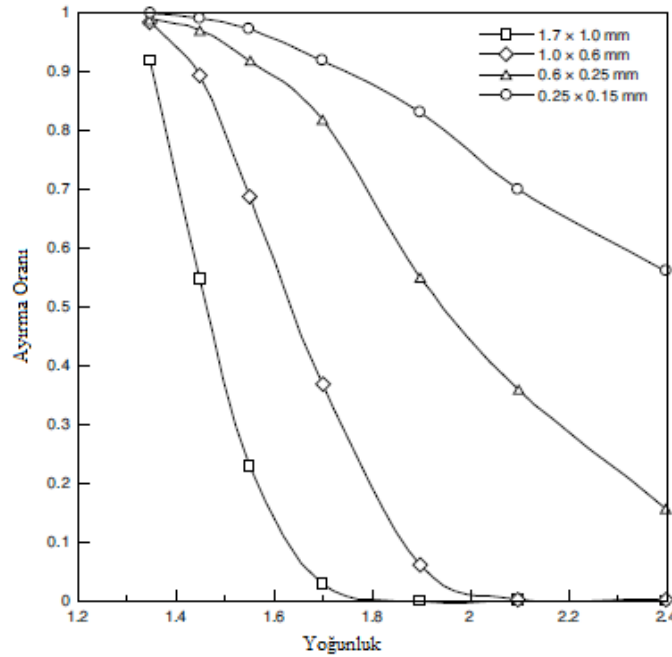


Şekil 1.18 Spiral devreleri (Tek kademeli spiral devresi(A), Ara ürünün temizleme devresine gönderildiği iki kademeli spiral devresi(B), Ara ürünün spiral devresine tekrar beslendiği iki kademeli spiral devresi(C)), (Luttrell, 2003)



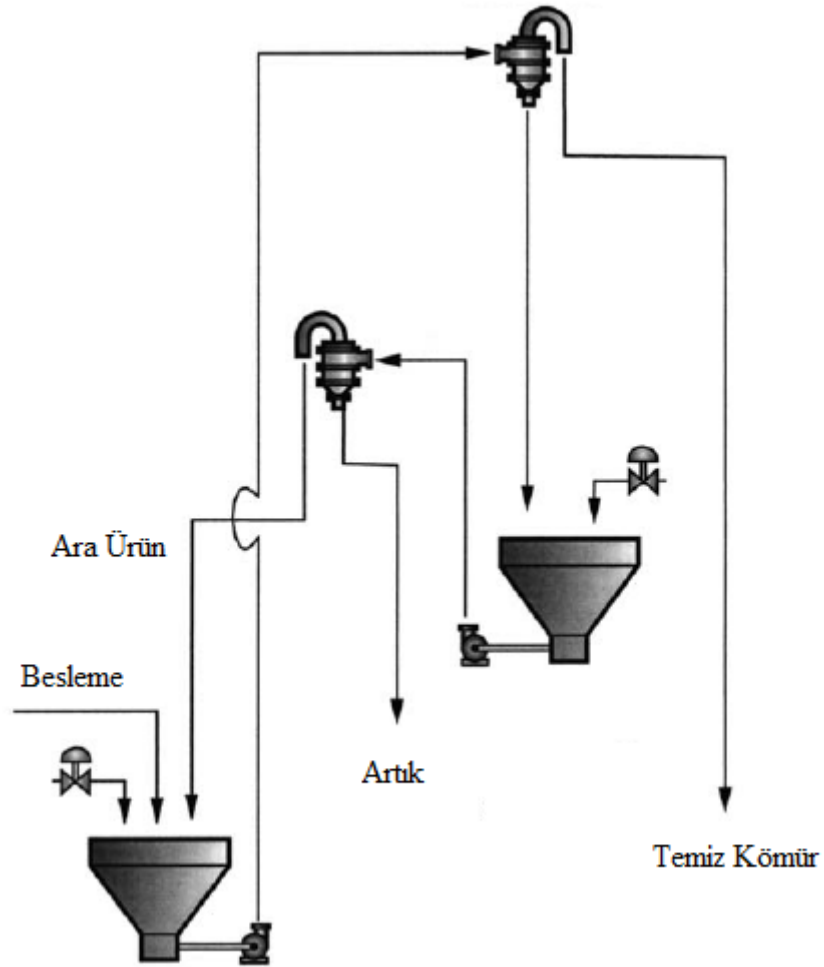
Şekil 1.19 Kömür spirali için tane boyutuna bağlı ayırma eğrileri (Luttrell, Ali, Dynys, Watters ve Moorhead 2012)

Spiral ile kömür zenginleştirmede, ince boyutlu ağır mineraller yoğunluğundan bağımsız olarak suyla taşınarak temiz kömüre karışmaktadır. Tane boyutu arttığında ise, iri tanelere etki eden su kuvveti artmakta ve aynı şekilde ağır mineraller kömürle karışmaktadır. Tanelere etki eden bu kuvvet tane yoğunluğuna bağlı olmadığından ayırma yoğunluğu tane boyutuna göre değişmektedir (Şekil 1.19).



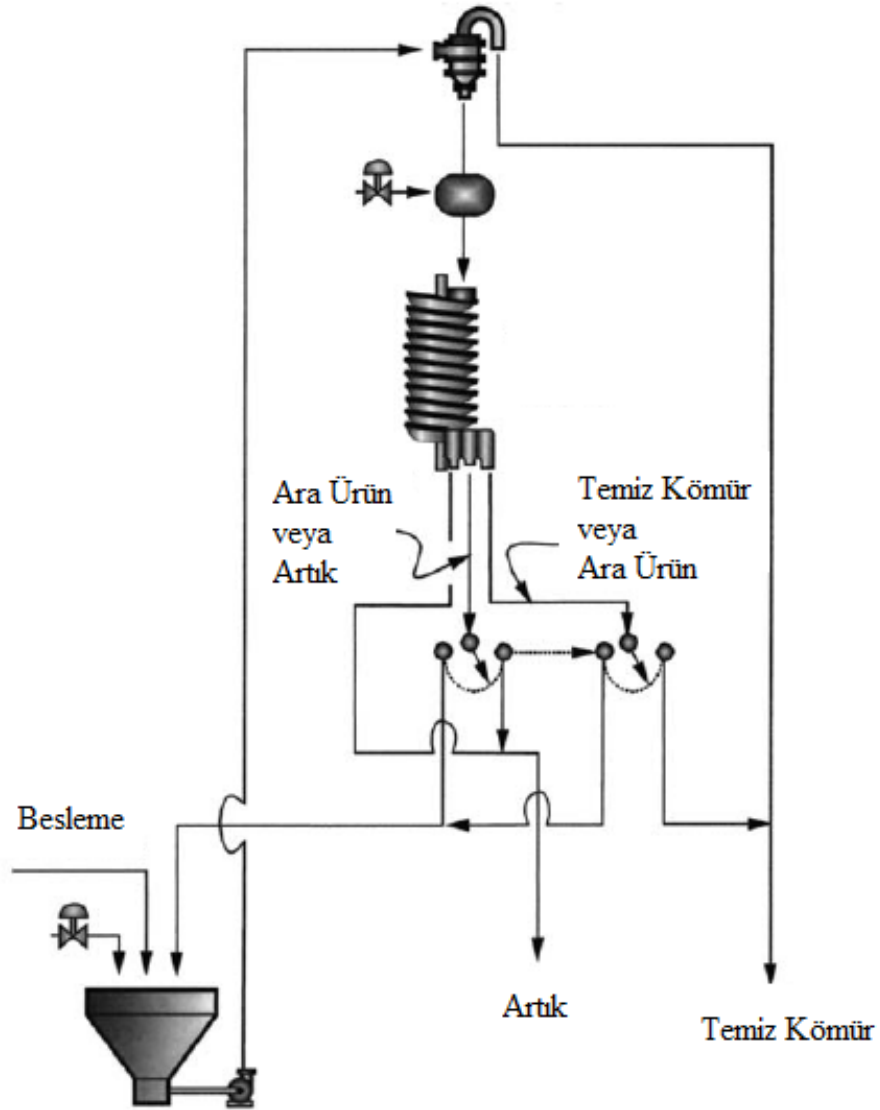
Şekil 1.20 Otojen siklonlarda tane boyutuna bağlı ayırma eğrileri (Luttrell vd., 2012)

İnce boyutlu kömür zenginleştirmede sıklıkla kullanılan bir diğer ayırıcıda otojen siklonlardır. Otojen siklonlarda ayırma, tanelerin efektif kütesine bağlıdır ve tane şekli ve tane boyutuna bağlı olarak ayırma yoğunluğu değişmektedir. İnce boyutta ayırım yaparken tanelerin bir kısmı yüksek sürüklenme kuvveti sebebiyle yoğunluğundan bağımsız olarak üst çıkışa yönelmektedir. İri boyutta ise tanelerin kütesi fazla olduğu için yoğunluğu düşük olmasına rağmen alt çıkışa gitmektedir. Bu durumda, düşük küllü kömür elde ederken yüksek oranda kayıp verilecek veya yüksek verimle ayırım yaparken kömür külü de yükselecektir (Şekil 1.20). Bu iki durumda zenginleştirme devreleri için iyi olmadığından otojen siklonlar ikili olarak veya spiral ile birlikte çalışmaktadır.



Şekil 1.21 İki otojen siklondan oluşan kömür zenginleştirme devresi (Bethell ve Moorhead, 2003)

İki otojen siklondan oluşan devrelerde, birinci siklon üst akımı temiz kömür olarak alırken alt akım pompa yardımıyla ikinci siklona beslenmektedir. İkinci siklonda ise üst akım, beslemeyle birleştirilip tekrar zenginleştirmesine gitmektedir ve alt akım ise, artık olarak alınmaktadır. Bu devrelerde verim artmasına rağmen gerekli ekipman artmakta ve tesis çalışması ile düzenleme yapılacağı zaman siklonların ayırma yoğunlukları tekrar düzenlemek zordur (Şekil 1.21).



Şekil 1.22 Otojen siklon ve spiral kömür zenginleştirme devresi (Bethell ve Moorhead, 2003)

Otojen siklonlar ve spiraller aynı boyutlarda çalışmasına rağmen farklı çalışma prensiplerine sahiptir. Otojen siklonlar düşük çalışma yoğunluğuna sahip fakat çok fazla kömür kaybıyla çalışmaktadır. Spiraller ise yüksek çalışma yoğunluğuna sahip

Otojen siklon ve spirallerin birlikte çalıştığı devreler birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir (Bethell ve Moorhead, 2003);

-

31

tanelerin çoğu alt akıma giderken, sadece en ince boyuta sahip taneler üst akıma gitmektedir. Burada düşük yoğunluğa sahip ayırma istendiğinden iri boyutlu kömürler de alt akıma gitmektedir. Spiralde ise, iri boyutlu kömürler temiz kömür olarak alınırken, ince boyutlu yan kayacın bir kısmı suyla beraber taşınarak temiz kömüre karışmaktadır (Luttrell vd., 2012).



BÖLÜM İKİ

MALZEME VE YÖNTEM

2.1 Malzeme

2.1.1 Aydın Bölgesi Kömürü Karakterizasyon Çalışmaları

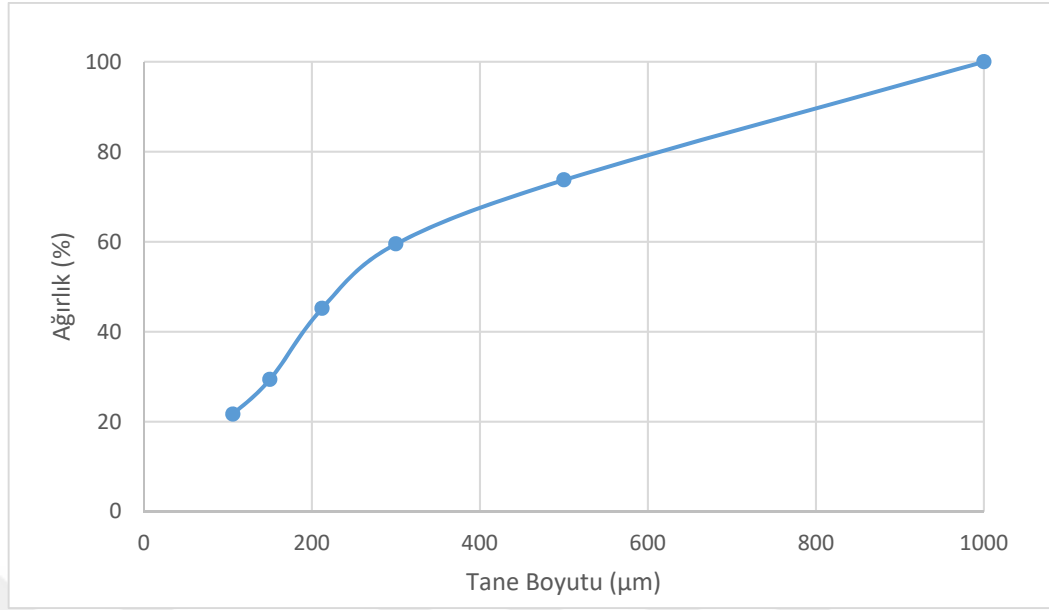
Tez çalışması kapsamında Aydın bölgesinden yaklaşık 500 kg tüvenan numune alınmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere, malzemeden konileme-dörtleme yöntemiyle 40 kg'lık numuneler alınmıştır. Sonrasında çeneli kırıcıda 1 mm altına inecek şekilde kapalı devre korumalı bir şekilde kırılmıştır. Numune hazırlama işlemleri tamamlanınca temsili numune alınarak boyut analizi, kimyasal analizler ve yüzdürme batırma testleri yapılmıştır (Tablo 2.1-2.2) (Şekil 2.1).

Tablo 2.1 Aydın kömürü besleme malı tane boyut analizi

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kül (%)
1-0,5	22,41	35,29
0,5-0,3	17,75	32,15
0,3-0,212	12,93	33,27
0,212-0,150	9,12	37,39
0,150-0,106	4,48	42,55
-0,106	33,31	61,03
Toplam	100	43,56

Tablo 2.2 Aydın kömürü kimyasal analizi (kuru baz)

Kül (%)	43,56
Uçucu Madde (%)	32,97
Sabit Karbon (%)	23,47
Kükürt (%)	1,41

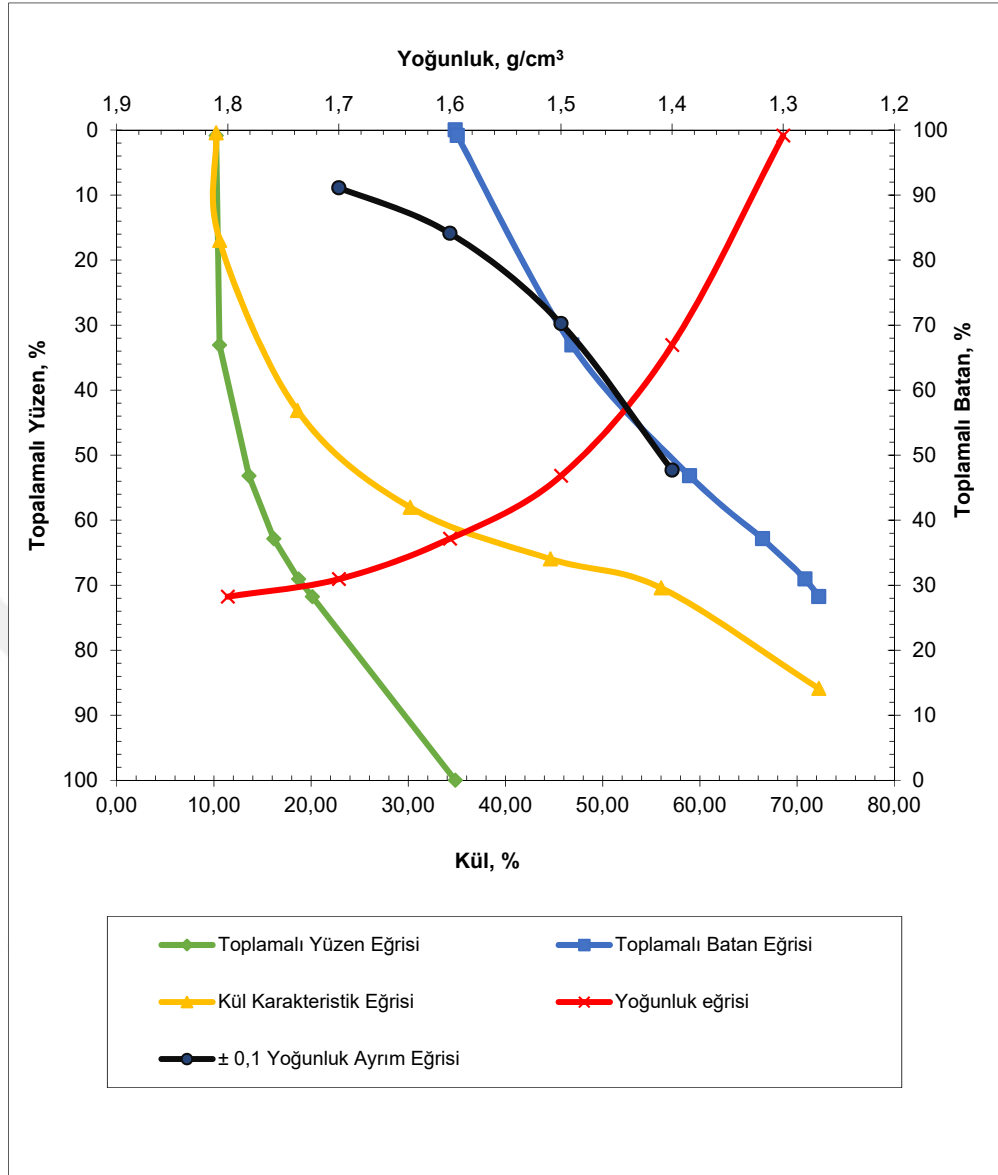


Şekil 2.1 Aydın kömürü toplamalı elek altı eğrisi

1 mm altı kömür numunesi 0,1 mm elekten elenmiş ve sonrasında yüzdürme-batırma testine tabi tutulmuştur. Yüzdürme-batırma testlerinde, yoğunluğu 1,3 g/cm³ sıvıdan başlanarak 1,8 g/cm³ yoğunlukları çinkoklorürle (ZnCl₂) ayarlanmış sıvılarla deneyler yapılmıştır. Bu işlemden sonra çıkan malzemeler çinkoklorürden ayrılincaya kadar yıkanmış ve kurutulmuştur. Kuruyan numunelerin tartımı alınmış ve kül analizi yapılarak Tablo 2.3’de görülen yüzdürme-batırma test sonuçları oluşturulmuştur.

Tablo 2.3 Aydın kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları

Yoğunluk	Yüzen Malzeme		Toplamalı Yüzen		Toplamalı Batan		
g/cm ³	% Ağ	% Kül	% Ağ	% Kül	% Ağ	% Kül	y=a ₀ +a ₁ /2
Yüzen 1,3	0,85	10,23	0,85	10,23	100	34,84	0,43
1,3 - 1,4	32,23	10,58	33,08	10,57	99,15	35,05	16,97
1,4 - 1,5	20,09	18,6	53,18	13,61	66,92	46,83	43,13
1,5 - 1,6	9,69	30,19	62,86	16,16	46,82	58,95	58,02
1,6 - 1,7	6,2	44,61	69,06	18,72	37,14	66,45	65,96
1,7 - 1,8	2,7	56	71,76	20,12	30,94	70,82	70,41
Batan 1,8	28,24	72,23	100	34,84	28,24	72,23	85,88
Toplam	100	34,84					



Şekil 2.2 Aydın kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları

Yüzdürme-batırma testi sonuçlarına göre, toplamalı yüzen, toplamalı batan, kül karakteristik eğrisi, yoğunluk eğrisi ve $\pm 0,1$ yoğunluk ayırma eğrileri çizilmiştir (Şekil 2.2).

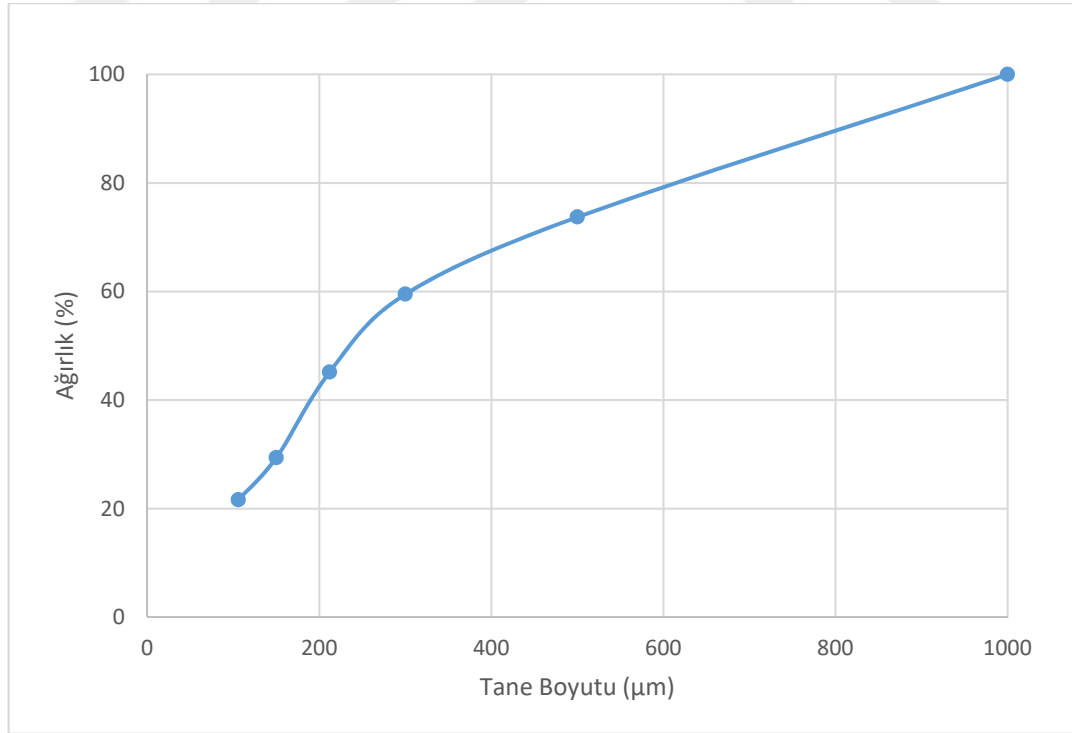
Kömürün yikanabilirliğini en iyi karakterize eden eğri kül karakteristik eğrisidir. Bu eğri kömür içerisindeki mineral madde dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Kömür taneleri farklı kül oranlarına sahiptir. Ancak, kömürün büyük bir kısmı düşük küllü ve ara ürün miktarı az olduğu zaman, kül karakteristik eğrisi yukarıdan aşağıya doğru dike yakın olarak incek ve belirli bir noktada yataya dönecektir. Bu şekilde

eğriye sahip olan kömürlerde, düşük küllü konsantre ile gang ve ara ürünü birbirinden ayırmak mümkündür (Kemal ve Arslan, 1999).

Aydın kömürüne ait kül karakteristik eğrisi incelendiğinde, eğrinin yukarıdan aşağıya doğru küllü yavaş yavaş yükseldiği ve herhangi bir bükülme noktası göstermediği görülmektedir. Böyle bir kömürde, konsantre, ara ürün ve gang kesin çizgilerle birbirinden ayrılmamaktadır. Bu nedenle bu kömürün yıkanabilmesi zordur.

2.1.2 Soma Bölgesi Kömürü Karakterizasyon Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında Soma bölgesinden yaklaşık 600 kg tüvenan numune alınmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere, malzemeden konileme-dörtleme yöntemiyle 40 kg'lık numuneler alınmıştır. Sonrasında çeneli kırıcıda 1 mm altına inecek şekilde kapalı devre korumalı bir şekilde kırılmıştır. Numune hazırlama işlemleri tamamlanınca temsili numune alınarak boyut analizi, kimyasal analizler ve yüzdürme batırma testleri yapılmıştır (Tablo 2.4-2.5) (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Soma kömürü toplamalı elek altı eğrisi

Tablo 2.4 Soma kömürü besleme malı tane boyut analizi

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kül (%)
1-0,5	26,28	42,22
0,5-0,3	14,22	41,77
0,3-0,212	14,33	43,55
0,212-0,150	15,79	42,83
0,150-0,106	7,74	45,31
-0,106	21,64	56,63
Toplam	100	45,8

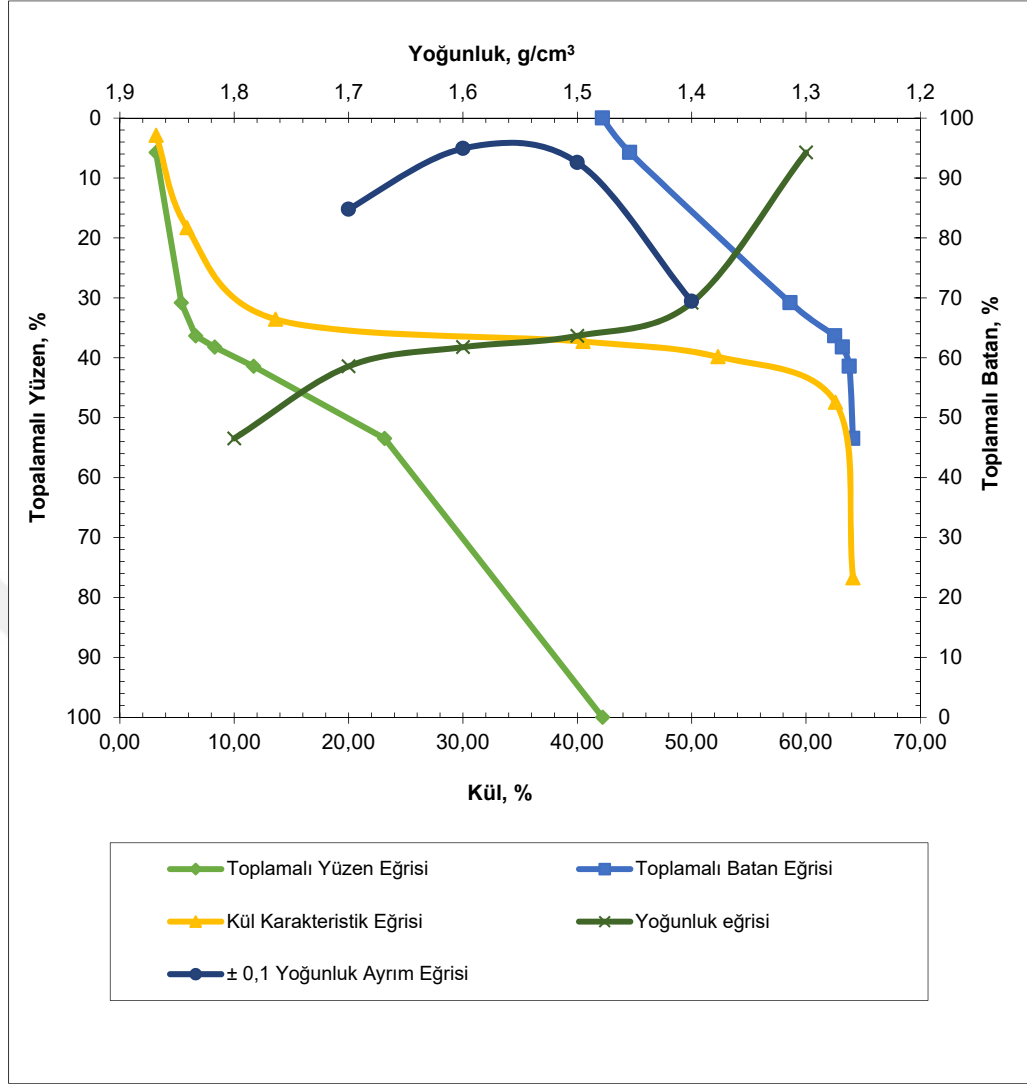
Tablo 2.5 Soma kömürü kimyasal analizi (kuru baz)

Kül (%)	45,8
Uçucu Madde (%)	34,91
Sabit Karbon (%)	19,29
Kükürt (%)	0,54

Tablo 2.6 Soma kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları

Yoğunluk	Yüzen Malzeme		Toplamalı Yüzen		Toplamalı Batan		
g/cm ³	% Ağ	% Kül	% Ağ	% Kül	% Ağ	% Kül	y=a ₀ +a ₁ /2
Yüzen 1,3	5,75	3,17	5,75	3,17	100	42,21	2,88
1,3 - 1,4	25,06	5,88	30,82	5,37	94,25	44,59	18,29
1,4 - 1,5	5,53	13,62	36,35	6,63	69,18	58,61	33,58
1,5 - 1,6	1,88	40,5	38,23	8,3	63,65	62,52	37,29
1,6 - 1,7	3,2	52,3	41,43	11,7	61,77	63,19	39,83
1,7 - 1,8	12,03	62,58	53,46	23,15	58,57	63,79	47,45
Batan 1,8	46,54	64,1	100	42,21	46,54	64,1	76,73
Toplam	100	42,21					

1 mm altı kömür numunesi 0,1 mm elekten elenmiş ve sonrasında yüzdürme-batırma testine tabi tutulmuştur. Yüzdürme-batırma testi sonuçları Tablo 2.6'da verilmektedir. Yüzdürme-batırma testi sonuçlarına göre, toplamalı yüzen, toplamalı batan, kül karakteristik eğrisi, yoğunluk eğrisi ve $\pm 0,1$ yoğunluk ayırma eğrileri çizilmiştir (Şekil 2.4).



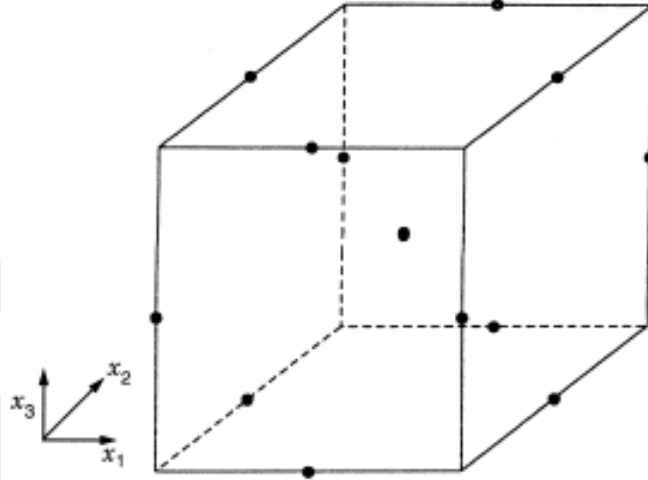
Şekil 2.4 Soma kömürü yüzdürme-batırma testi sonuçları

Soma kömürüne ait kül karakteristik eğrisi incelendiğinde, eğrinin yukarıdan aşağıya doğru dik geldiği ve bir noktadan sonra bükülme gösterdiği görülmektedir. Böyle bir kömürde, konsantre, ara ürün ve gang birbirinden ayrı hareket etmektedir. Bu nedenle bu kömürün yıkanabilmesi kolaydır.

2.2 Yöntem

Tez çalışmasında, numune hazırlama işlemlerinden sonra deney tasarımı yapılmıştır. Minitab 17 programı ve Box-Behnken tasarımı kullanılarak üç parametre üç seviye olacak şekilde deney setleri oluşturulmuştur.

Box ve Behnken 1960 yılında, ikincil dereceden yanıt yüzeyleri için verimli üç seviyeli tasarım geliştirmişlerdir. Her bir etken üç düzeye sahiptir. Box-Behnken tasarımı için deneme noktasının sayısı $N = 2k(k-1) + n_c$ (k:parametre sayısı, n_c :tekrar deneyi sayısı) denklemiyle belirlenmektedir. Bu denklemde k düzey sayısını, n_c merkezi deneme sayısını belirtmektedir. (Meyers, Montgomery, ve Anderson-Cook, 2016).



Şekil 2.5 k=3, tek merkez noktası olduğunda Box-Behnken tasarımı (Meyers, vd., 2016).

Deney tasarımı oluşturulduktan sonra model oluşturmak için bağımlı değişkenleri (kül oranı ve temiz kömür miktarı) açıklayan ikinci dereceden bir polinom verilmektedir.

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3$$

Burada;

y_n bağımlı değişkenler (ağırlıkça temiz kömür miktarı ve temiz kömür kül oranı) x_1 , x_2 ve x_3 cinsinden kodlanmış bağımsız değişkenlerin fonksiyonudur.

β_0 regresyon katsayısı,

β_1 - β_3 doğrusal katsayı,

β_4 - β_6 ikinci dereceden katsayılar,

ve β_7 - β_9 ikili etkileşim katsayılarıdır. (Öney ve Samanlı 2017).

Çalışmalarda otojen siklon (Şekil 2.6) ve kömür spirali (Şekil 2.7) kullanılmıştır. Otojen siklon boyutları Tablo 2.7’de verilmektedir. Çalışmada kullanılan otojen siklon, tasarım parametrelerini denemek amacıyla çok sayıda parçadan oluşmaktadır.

Siklon gövde uzunluğu, üst çıkış borusu dalma derinliği, konik açısı ve üst çıkış çapı parametreleri için üçer farklı parça bulunmaktadır. Belirlenen parametrelere göre siklon üzerinde değişiklikler yapılmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Deneyler kullanılan otojen siklon

Tablo 2.7 Otojen siklon boyutları

Silindir çapı	200 mm
Silindir uzunluğu	270 mm
Alt çıkış çapı	30 mm
Konik açısı	140°
Giriş çapı	50 mm

Deney setleri bağlı olarak cihazların tasarım ve işletme parametreleri ayarlandıktan sonra numune eklenerek sistem devreye alınmıştır. Deneyler pompa tankı, pompa ve zenginleştirme cihazı (otojen siklon ve spiral) ile kapalı devre olarak çalıştırılmıştır. Deney çalışmalarında izlenen yöntem aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır;

- Besleme malı (- 1mm tüvenan numune) pompa tankına beslenmiş ve üzerine su eklenerek gerekli katı oranına getirilmiştir.
- Besleme hızı, pompa hızı değiştirilerek ayarlanmıştır.
- Sistem birkaç dakikalığına çalıştırılarak stabil hale gelmesi beklenmiştir.
- Konsantre ve artık çıkışından aynı anda belirli bir süre (8-10 sn) numune alınmıştır.
- Alınan numuneler susuzlandırma eleklerini simüle etme amaçlı 0,1 mm elekten elenmiştir.
- Son aşamada, numuneler kurutulup tartıldıktan sonra kül analizi yapılmıştır.

Alınan numunelerin ağırlıklarını kullanmak hataya sebebiyet verebileceğinden temiz kömür miktarı aşağıda verilen formülden hesaplanmıştır.

$$\frac{C}{F} = \frac{f-t}{c-t} \quad (2.1)$$

C: Temiz kömür ağırlığı (%)

F: Besleme malı ağırlığı (%)

f: Besleme malı kül oranı (%)

t: Artığın kül oranı (%)

c: Temiz kömürün kül oranını (%) ifade etmektedir.



Şekil 2.7 Kömür spirali

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Aydın Kömürü ile Yapılan Zenginleştirme Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında, Aydın bölgesine ait linyit kömürünün otojen siklon ve spiral ile zenginleştirilme olanakları araştırılmıştır. Her iki cihaz için, literatür araştırması yapıldıktan sonra parametreler ve seviyeleri belirlenmiştir. – 1mm kömür numunesi hazırlandıktan sonra cihaz parametreleri ayarlanmış ve deneyler yapılmıştır.

3.1.1 Aydın Kömürü Spiral ile Zenginleştirme Deneyleri

Linyit kömürlerinin spiral ile zenginleştirilmesi hakkında yapılan çalışmalar incelendiğinde, katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığı parametrelerinin ayırmaya etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Minitab 17 programı kullanılarak, Box-Behnken tasarımı ile deney programı hazırlanmıştır (Tablo 3.1). Deney tasarımına bağlı 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.1 Aydın kömürü spiral için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
A	Katı oranı	(%)	15	20	25
B	Besleme hızı	(lt/dk)	32	40	48
C	Ayırıcı açıklığı	(cm)	3	6	9

Tablo 3.2’de parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.1 ve 3.2 de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Aydın kömürü spiral deney sonuçları

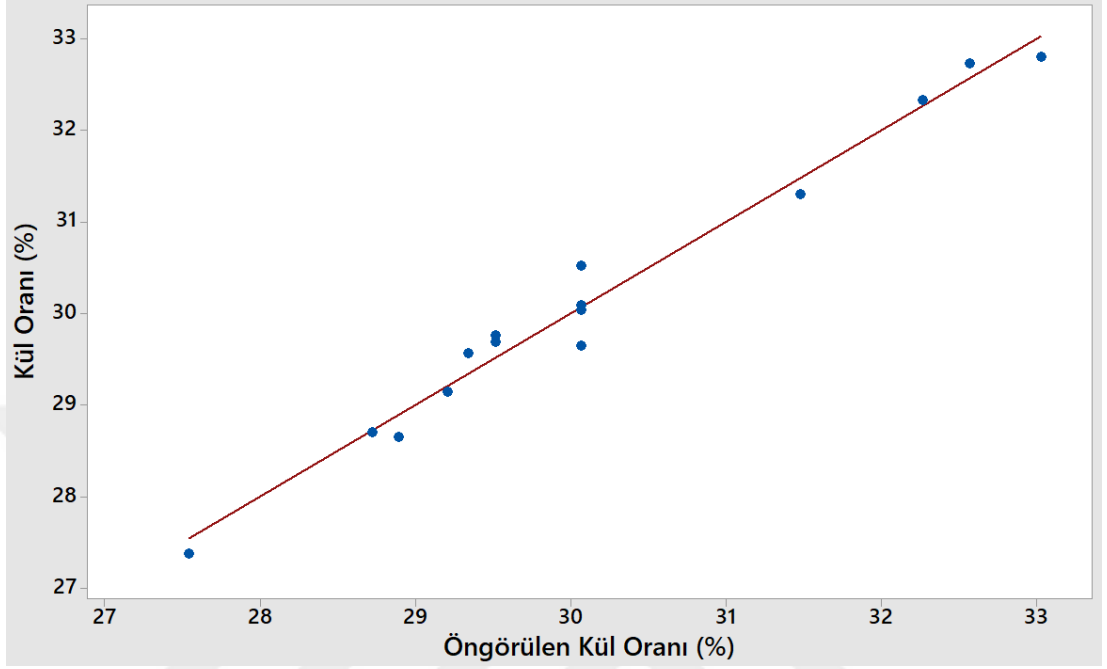
Deney No	Katı Oranı (%) A	Besleme Hızı (L/dk) B	Ayırıcı Açıklığı (cm) C	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	15	32	6	27,38	27,54	64,12	63,56
2	20	40	6	29,65	30,07	71,66	72,22
3	15	40	9	28,70	28,72	67,95	68,49
4	15	48	6	29,76	29,52	70,27	70,10
5	20	48	3	31,30	31,48	76,01	75,99
6	20	40	6	30,53	30,07	73,36	72,22
7	25	48	6	32,73	32,57	82,36	82,93
8	20	40	6	30,04	30,07	71,64	72,22
9	20	32	3	29,57	29,35	65,69	66,06
10	20	48	9	32,81	33,03	82,68	82,32
11	15	40	3	29,14	29,21	67,47	67,67
12	25	32	6	28,66	28,90	66,05	66,23
13	25	40	3	30,09	30,07	72,14	71,59
14	25	40	9	32,34	32,27	80,26	80,06
15	20	32	9	29,70	29,52	69,00	69,02

$$\text{Kül oranı (\%)} = 31,93 + 0,500 A - 0,331 B - 2,131 C - 0,02432 A^*A + 0,00262 B^*B + 0,0671 C^*C + 0,01060 A^*B + 0,0448 A^*C + 0,01433 B^*C \quad (3.1)$$

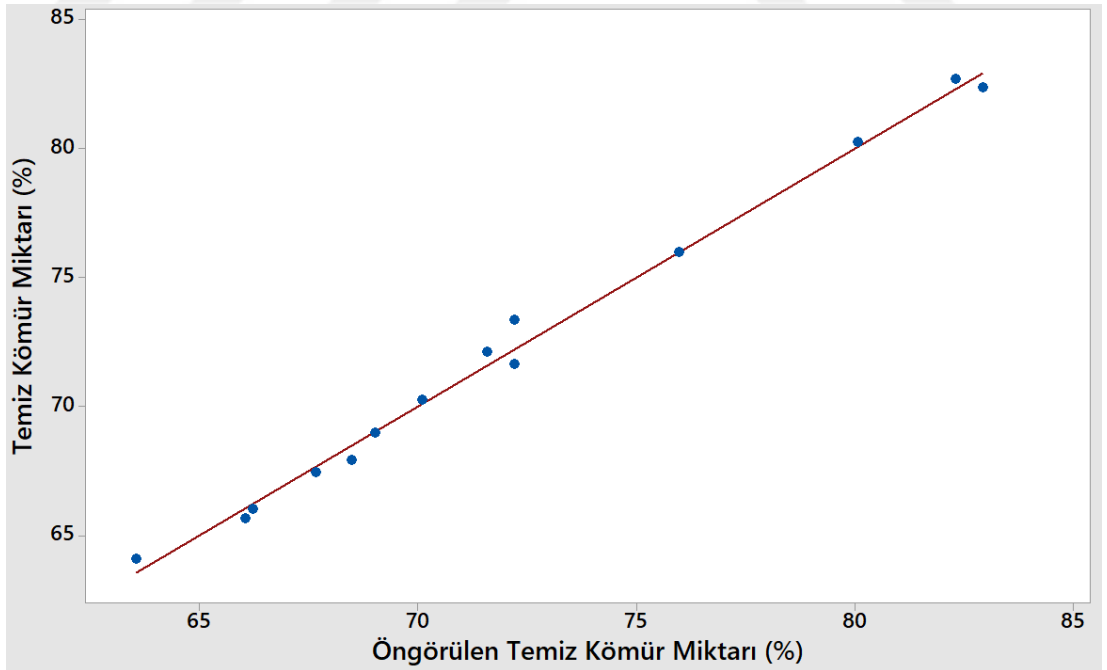
$$\text{Temiz kömür miktarı (\%)} = 77,4 - 0,202 A - 0,675 B - 4,76 C - 0,0582 A^*A - 0,00099 B^*B + 0,1319 C^*C + 0,0635 A^*B + 0,1273 A^*C + 0,0351 B^*C \quad (3.2)$$

Deney sonuçları ve eşitlik 3.1 ve 3.2'den oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.1 ve 3.2'de verilmektedir. R² değerleri kül oranı için %97,86 ve temiz kömür miktarı için %99,28

olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1 Aydın kömürü spiral ile zenginleştirme sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 3.2 Aydın kömürü spiral ile zenginleştirme sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Tablo 3.3 Aydın kömürü spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	33,187	3,687	25,370	0,001
A	1	9,715	9,715	66,840	0,000
B	1	15,950	15,950	109,740	0,000
C	1	1,479	1,479	10,180	0,024
A*A	1	1,365	1,365	9,390	0,028
B*B	1	0,104	0,104	0,720	0,436
C*C	1	1,347	1,347	9,270	0,029
A*B	1	0,719	0,719	4,950	0,077
A*C	1	1,806	1,806	12,430	0,017
B*C	1	0,473	0,473	3,260	0,131
Lack-of-fit	3	0,338	0,113	0,580	0,683
Pure error	2	0,389	0,194		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,683 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri (A,B,C) Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Model için en önemli parametreyi F değeri belirlemektedir. F değerinin yüksek olması parametrenin model üzerindeki etkisinin daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. F değeri incelendiğinde $B > A > C$ olduğu görülmektedir.

Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri

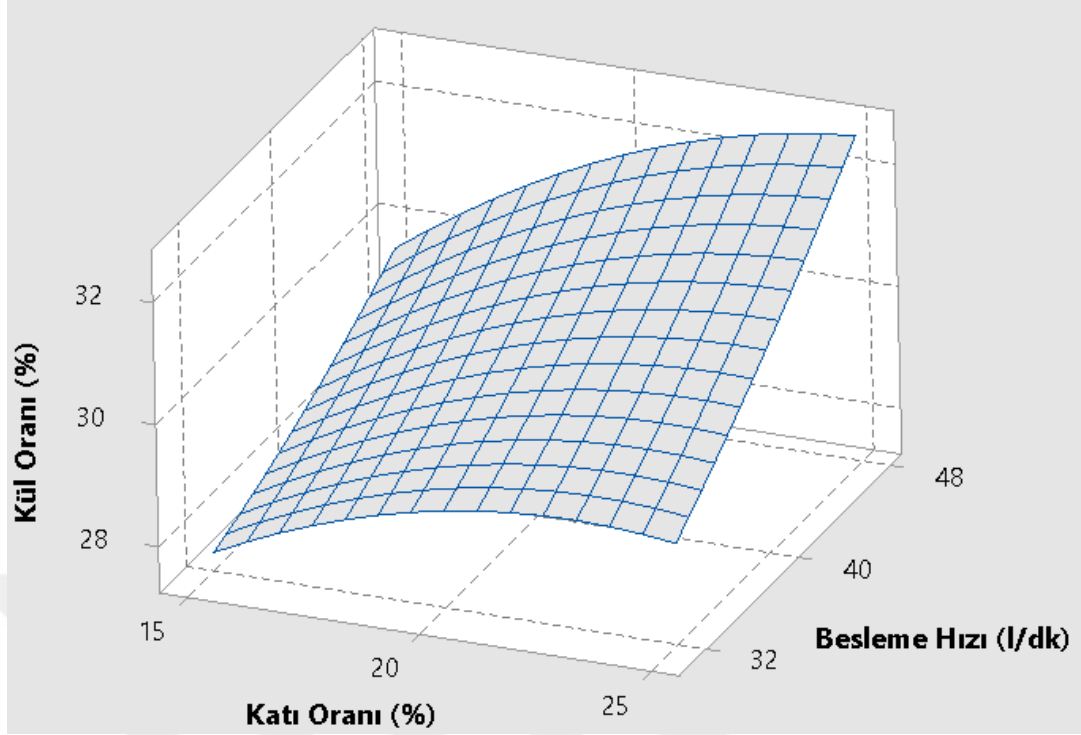
0,05'den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ana parametrelerin model üzerindeki etkisi incelendiğinde $C > A > B$ olduğu görülmektedir.

Tablo 3.4 Aydın kömürü spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

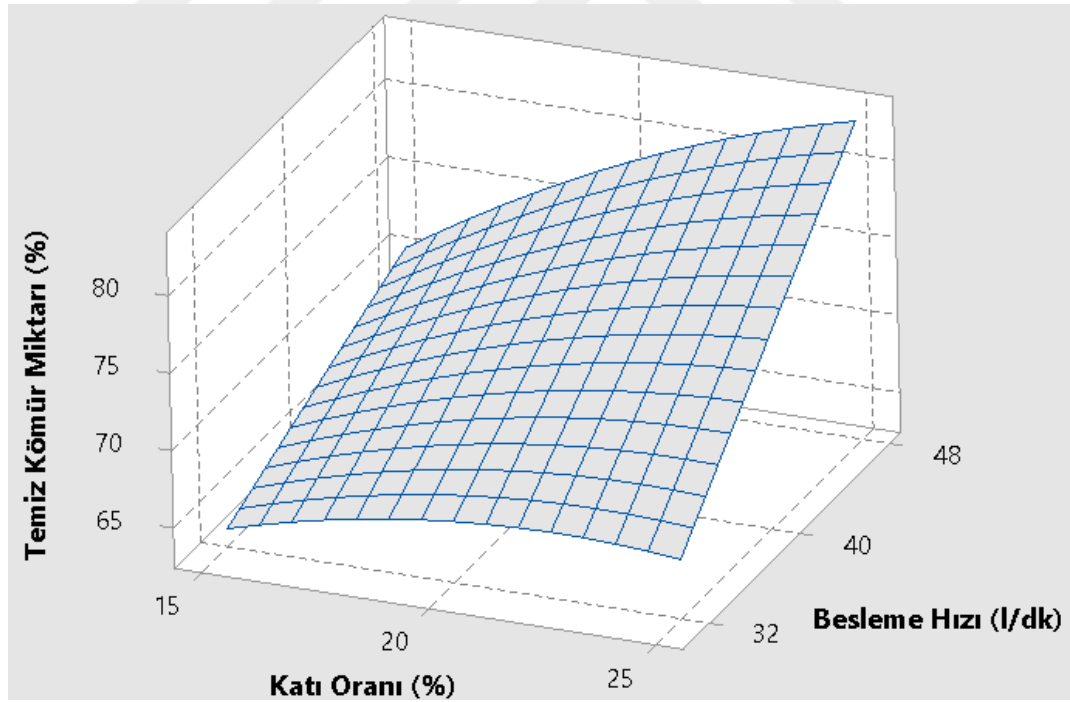
	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	490,466	45,541	76,310	0,000
A	1	120,121	120,121	168,200	0,000
B	1	269,834	269,834	377,830	0,000
C	1	43,199	43,199	60,490	0,001
A*A	1	7,805	7,805	10,930	0,021
B*B	1	0,015	0,015	0,020	0,891
C*C	1	5,205	5,205	7,290	0,043
A*B	1	25,793	25,793	36,120	0,002
A*C	1	14,596	14,596	20,440	0,006
B*C	1	2,843	2,843	3,980	0,103
Lack-of-fit	3	1,630	0,543	3,980	0,691
Pure error	2	1,940	0,970		

3.1.1.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi

Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi Şekil 3.3'de ve temiz kömür miktarına etkisi Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü üzere katı oranı ve besleme hızı arttıkça temiz kömür kül oranı artmaktadır. Katı oranının artmasıyla engelli çökelme şartlarına bağlı olarak ayırma yoğunluğu da artmaktadır. Ayırma yoğunluğunun artmasıyla birlikte yüksek yoğunluklu yantaşın bir kısmı da temiz kömür çıkışından çıkarak elde edilen konsantre kül oranını arttırmıştır.



Şekil 3.3 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi



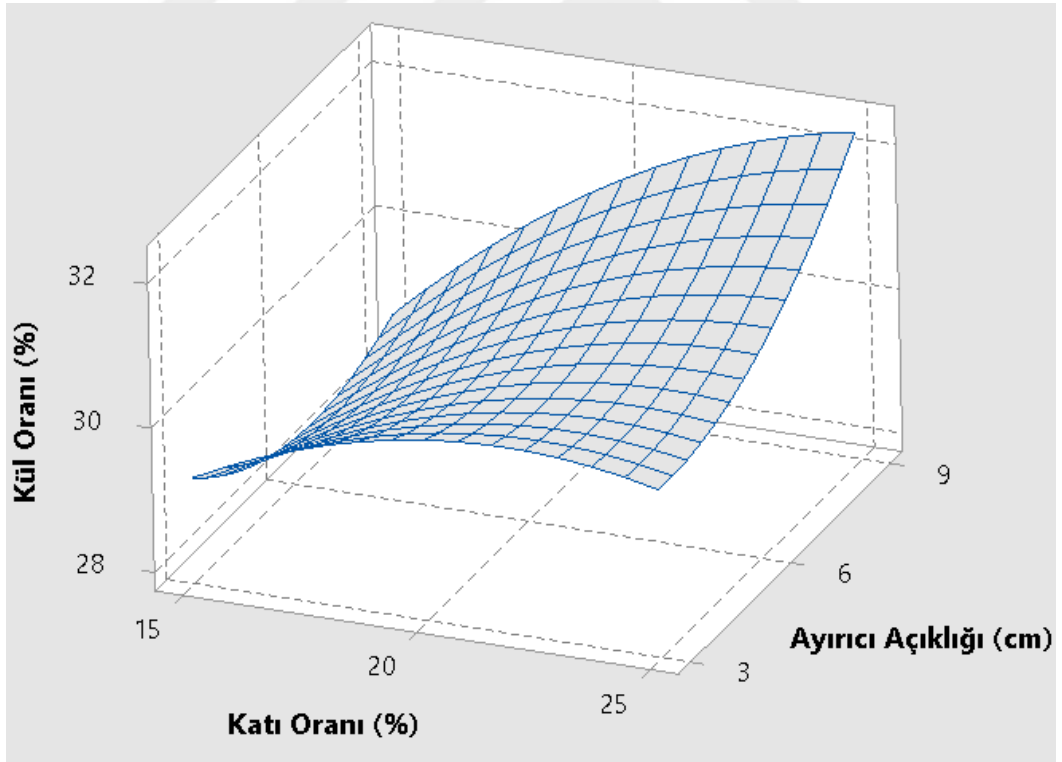
Şekil 3.4 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi

Şekil 3.4’de besleme hızı ve katı oranının temiz kömür miktarına etkisi verilmektedir. Katı oranı ve besleme hızı parametreleri arttıkça temiz kömür miktarı

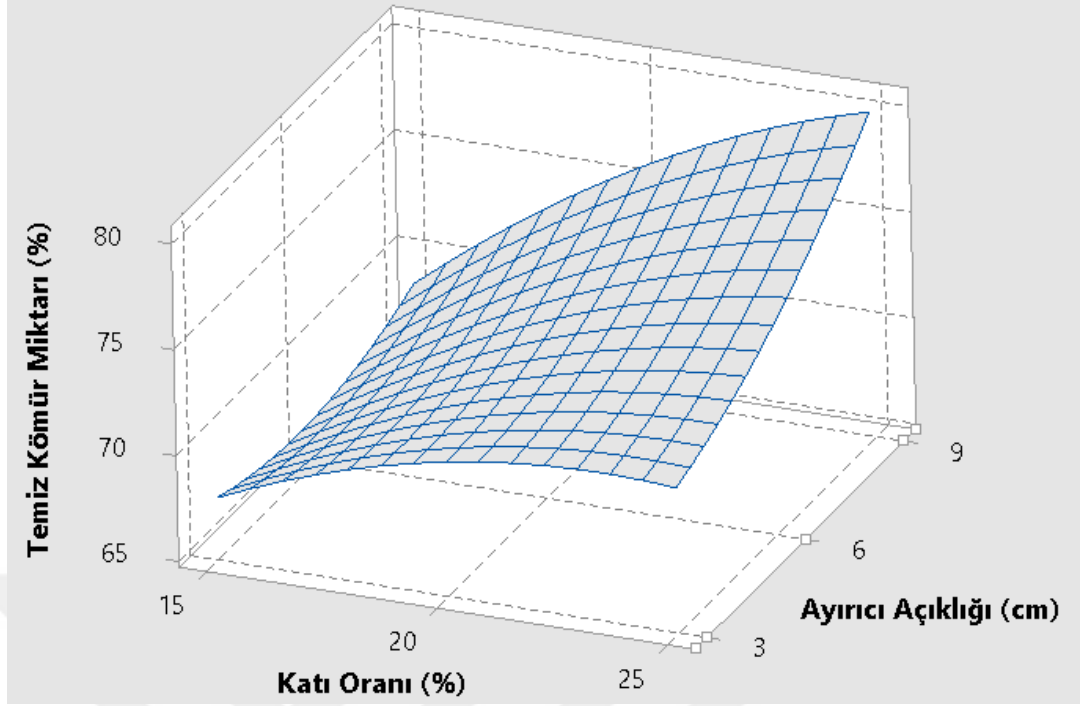
da buna bağılı olmak üzere artmıştır. Besleme hızının artmasıyla spiral yüzeyindeki pülp hızı artmakta ve yüksek yoğunluk tanelerin bir kısmını da hafif tanelerle birlikte spiral çeperine doğru itmektedir. Bu nedenle daha fazla malzeme temiz kömür çıkışına giderek ağırlıkça temiz kömür miktarını arttırmaktadır.

3.1.1.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi

Katı oranı ve ayırıcı açıklığının, temiz kömür kül oranı ve miktarına etkisini açıklamak için grafikler çizilmiştir (Şekil 3.5 -3.6). Ayırıcı açıklığı arttıkça kül oranının arttığı görülmektedir. Spiral yüzeyinde malzeme merkezde yoğunluğu fazla ve kenarlarda hafif taneler olacak şekilde hareket etmektedir. Bu nedenle ayırıcı açıklığının artması, spiral kenarı ile merkezi arasındaki daha büyük bir alanı taradığından yoğunluğu fazla olan tanelerinde temiz kömüre karışmasına sebep olmuştur.

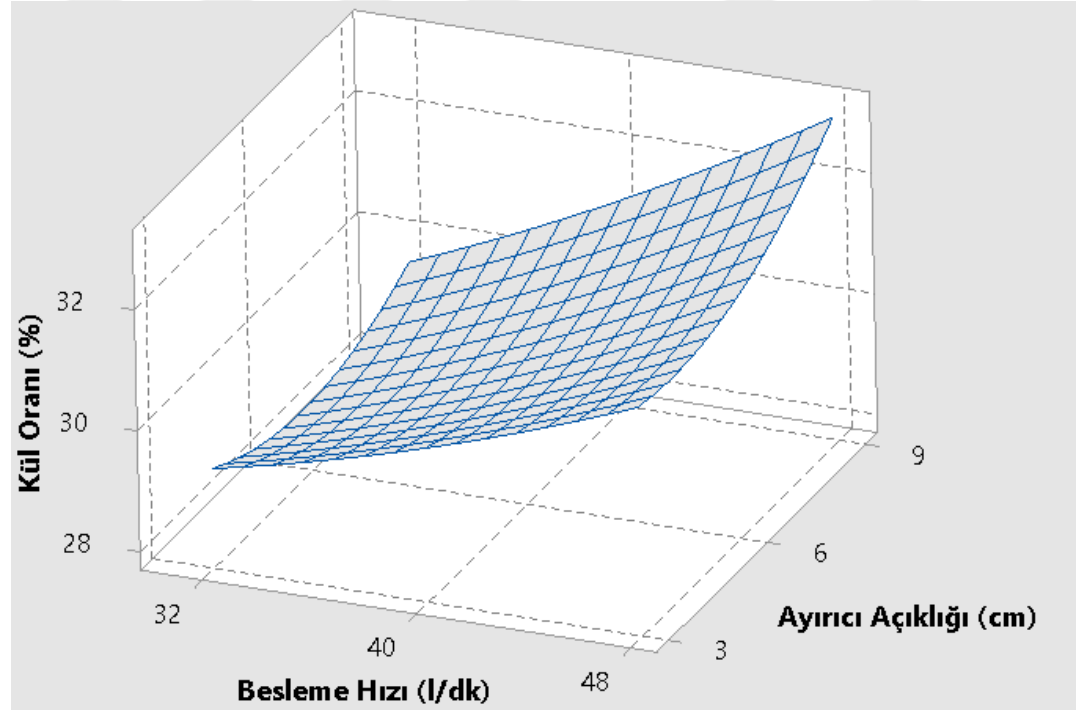


Şekil 3.5 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi



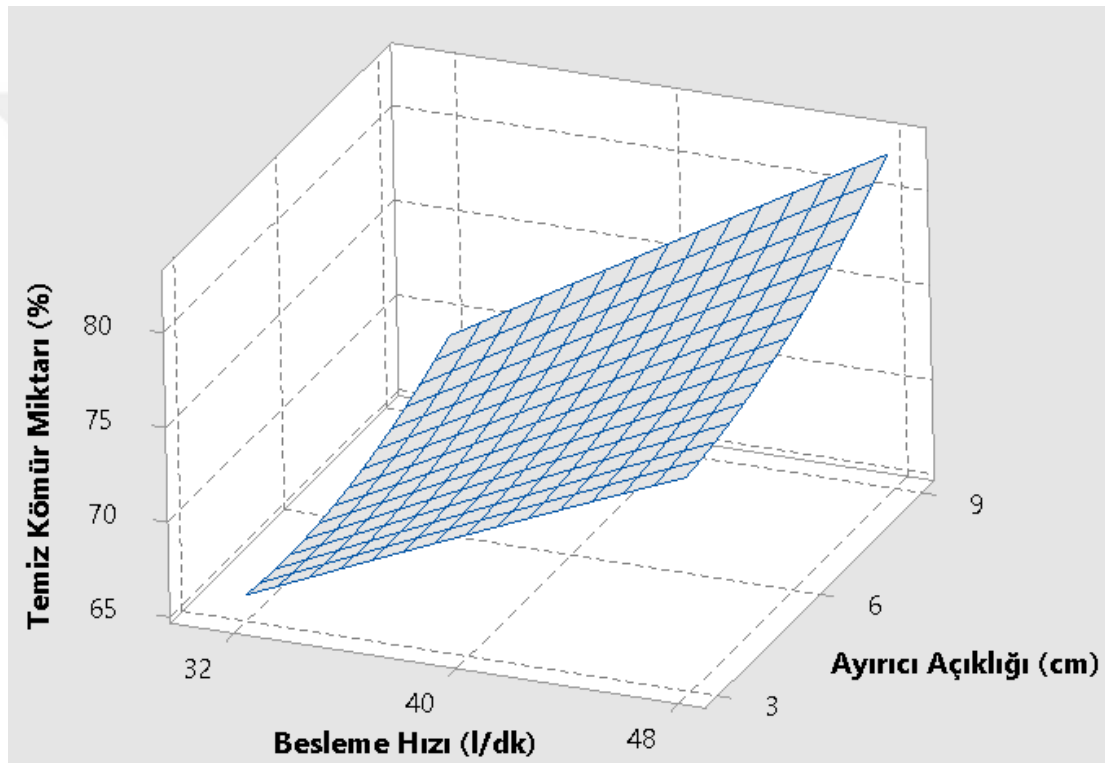
Şekil 3.6 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

3.1.1.3 Besleme hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi



Şekil 3.7 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi

Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının, temiz kömür kül oranına ve temiz kömür miktarına etkisi Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Düşük besleme hızında ağır tanelerin büyük çoğunluğu spiral merkezinde hareket etmektedir ve ayırıcı açıklığı değiştirildiğinde kül oranı ve temiz kömür miktarı fazla etkilenmemektedir. Besleme hızı arttıkça ağır tanelerin bir kısmı da spiral çeperine doğru hareket etmektedir. Bu nedenle yüksek besleme hızlarında spiral ara ürün bölgesinde daha fazla ağır malzeme olmakta ve ayırıcı açıklığı arttıkça ağır tanelerin bir kısmı temiz kömür çıkışından alınmaktadır. Bu nedenle temiz kömür kül oranı ve miktarı artmaktadır.



Şekil 3.8 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

3.1.2 Aydın Kömürü Otojen Siklon ile Zenginleştirme Deneyleri

Otojen siklonda katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapının zenginleştirmeye olan etkisini araştırmak için Minitab 17 programı kullanılarak, Box-Behnken tasarımı ile deney programı hazırlanmıştır (Tablo 3.5). Deney tasarımına bağlı 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.5 Aydın kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
X	Katı oranı	(%)	10	20	30
Y	Besleme basıncı	(bar)	0,3	0,4	0,5
Z	Üst çıkış çapı	(cm)	6,5	7,5	8,5

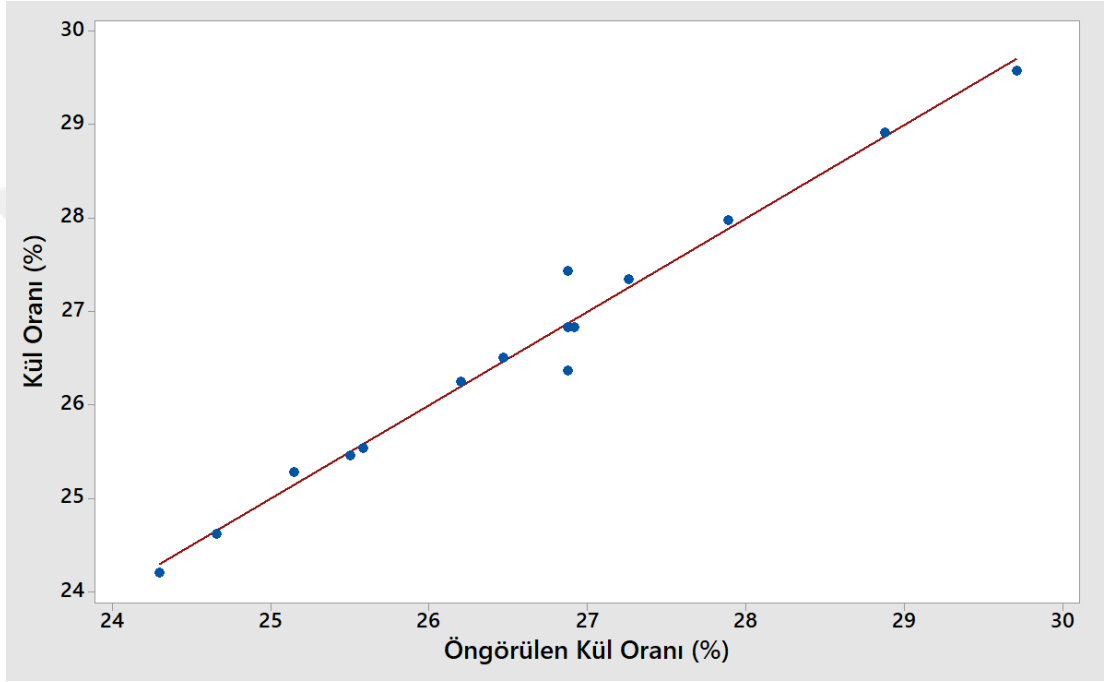
Tablo 3.6 Aydın kömürü otojen siklon deney sonuçları

Deney No	Katı Oranı (%) X	Besleme basıncı (bar) Y	Üst çıkış çapı (cm) Z	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	10	0,5	7,5	26,51	26,47	58,58	58,59
2	10	0,3	7,5	24,62	24,66	56,83	56,73
3	10	0,4	6,5	24,21	24,30	56,27	56,85
4	10	0,4	8,5	27,35	27,26	58,41	57,92
5	20	0,3	8,5	25,54	25,59	58,32	58,92
6	20	0,5	8,5	29,58	29,71	59,66	60,14
7	20	0,4	7,5	27,43	26,88	59,63	60,20
8	20	0,4	7,5	26,37	26,88	60,84	60,20
9	20	0,4	7,5	26,83	26,88	60,14	60,20
10	20	0,3	6,5	25,28	25,15	56,94	56,46
11	20	0,5	6,5	26,25	26,21	59,67	59,07
12	30	0,4	6,5	26,83	26,92	56,58	57,07
13	30	0,3	7,5	25,46	25,50	57,61	57,60
14	30	0,5	7,5	28,92	28,88	59,46	59,56
15	30	0,4	8,5	27,98	27,89	60,12	59,54

Tablo 3.6’da parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.3 ve 3.4 de gösterilmektedir.

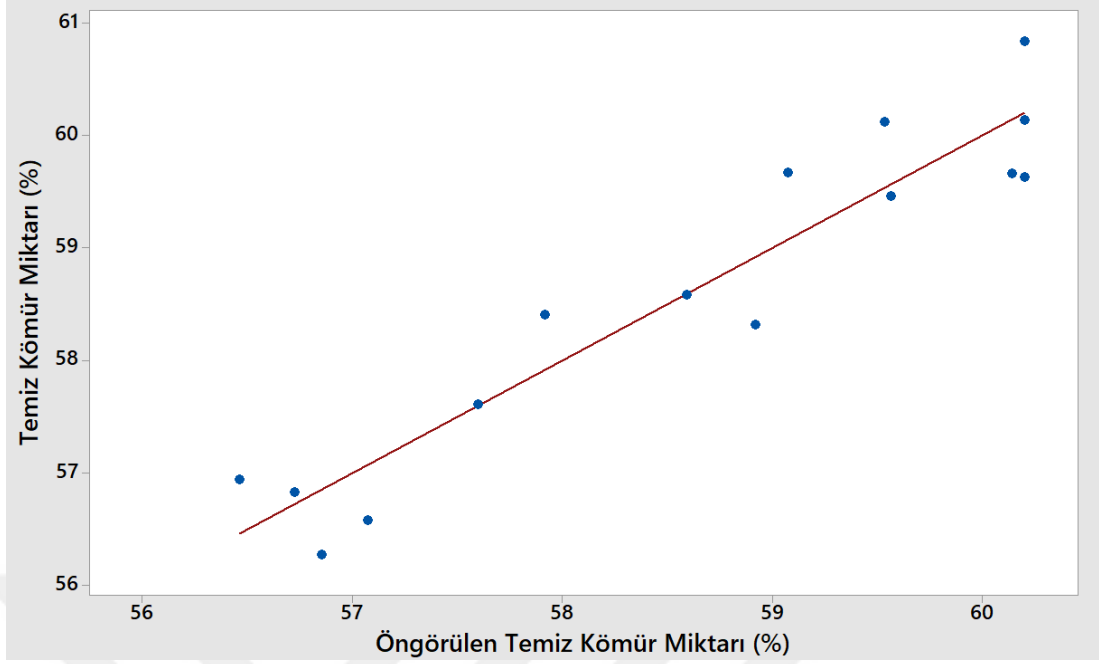
$$\text{Kül Oranı (\%)} = 26,8 + 0,411 X - 35,3 Y - 1,10 Z - 0,00285 X*X - 21,5 Y*Y + 0,000 Z*Z + 0,393 X*Y - 0,0498 X*Z + 7,68 Y*Z \quad (3.3)$$

$$\text{Temiz Kömür Miktarı (\%)} = -23,6 + 0,351 X + 86,4 Y + 15,30 Z - 0,01443 X*X - 64,0 Y*Y - 0,915 Z*Z + 0,025 X*Y + 0,0350 X*Z - 3,48 Y*Z \quad (3.4)$$



Şekil 3.9 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Deney sonuçları ve eşitlik 3.3 ve 3.4'den oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.9 ve 3.10'da verilmektedir. R^2 değerleri kül oranı için %97,97 ve temiz kömür miktarı için %89,74 olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.10 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Tablo 3.7 Aydın kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	30,835	3,429	26,760	0,001
X	1	5,281	5,281	41,210	0,001
Y	1	13,416	13,416	104,690	0,000
Z	1	7,762	7,762	60,570	0,001
X*X	1	0,299	0,299	2,330	0,187
Y*Y	1	0,170	0,170	1,330	0,301
Z*Z	1	0,000	0,000	0,000	0,998
X*Y	1	0,616	0,616	4,810	0,080
X*Z	1	0,990	0,990	7,730	0,039
Y*Z	1	2,356	2,356	18,390	0,008
Lack-of-fit	3	0,076	0,025	0,090	0,959
Pure error	2	0,565	0,283		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır (Tablo 3.6). Modelin Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,959 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri (X,Y,Z) Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Ana parametreler olan katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapı için F değeri, sırasıyla 41,21, 104,69, 60,57 olarak bulunmuştur. Buna göre parametrelerin önem sırası Y>Z>X olarak belirtilebilir.

Tablo 3.8 Aydın kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

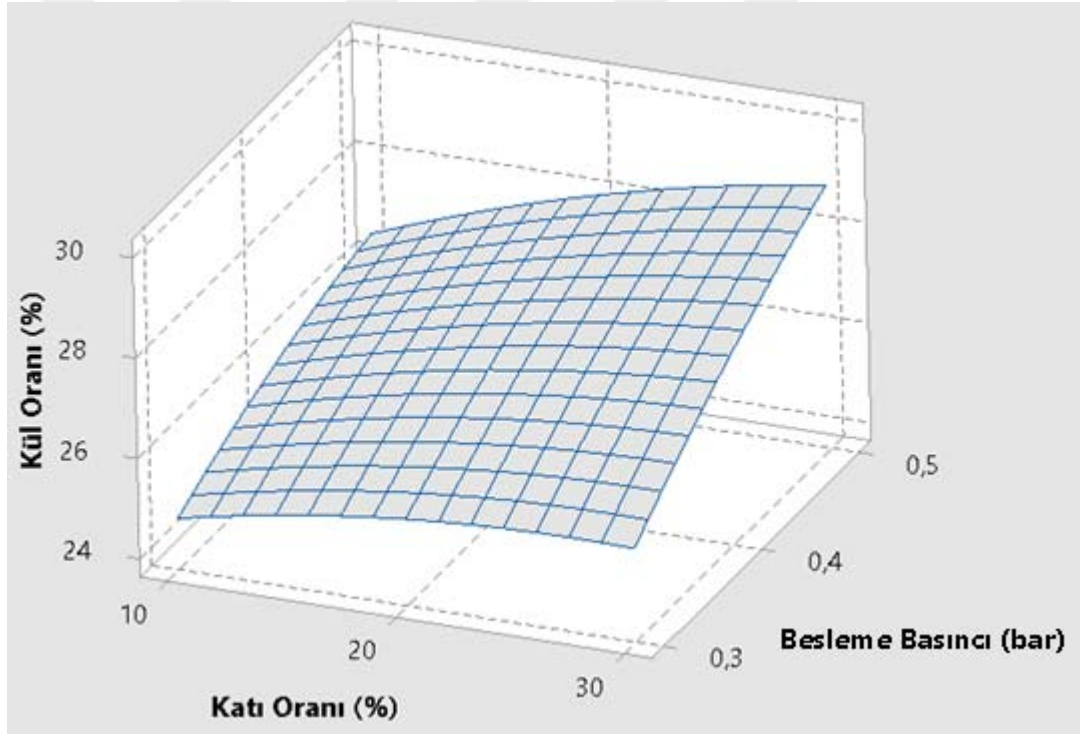
	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F-Değeri	Prob>F
Model	9	27,157	3,017	4,860	0,048
X	1	1,693	1,693	2,730	0,160
Y	1	7,354	7,354	11,850	0,018
Z	1	6,213	6,213	10,010	0,025
X*X	1	7,687	7,687	12,380	0,017
Y*Y	1	1,514	1,514	2,440	0,179
Z*Z	1	3,094	3,094	4,980	0,076
X*Y	1	0,003	0,003	0,000	0,952
X*Z	1	0,490	0,490	0,790	0,415
Y*Z	1	0,483	0,483	0,780	0,418
Lack-of-fit	3	2,366	0,369	2,140	0,335
Pure error	2	0,738			

Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05'den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ana parametrelerin model üzerindeki etkisi incelendiğinde katı oranını Prob>F değerinin

0,05'den fazla olması sebebiyle oluşturulan model için anlamsızdır. Diğer parametrelerin F değerlerinin yakın olması modele aynı derecede etki ettiğini göstermektedir.

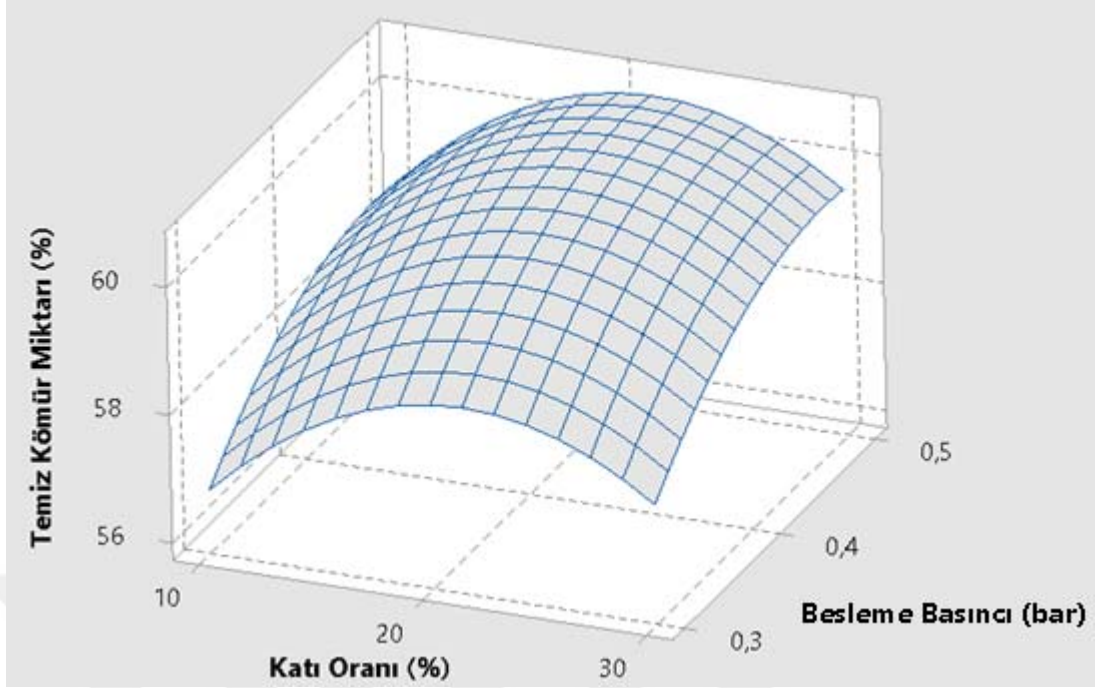
3.1.2.1 Katı oranı ve Besleme Basıncının Etkisi

Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına etkisi Şekil 3.11'de ve temiz kömür miktarına etkisi Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Katı oranı ve besleme basıncı arttıkça temiz kömür kül oranı az bir oranda artmaktadır. Katı oranının artmasıyla siklon içerisinde oluşan ortamın yoğunluğu da artmakta ve ağır tanelerin bir kısmı üst çıkışa doğru yönelerek temiz kömür kül oranını arttırmaktadır.



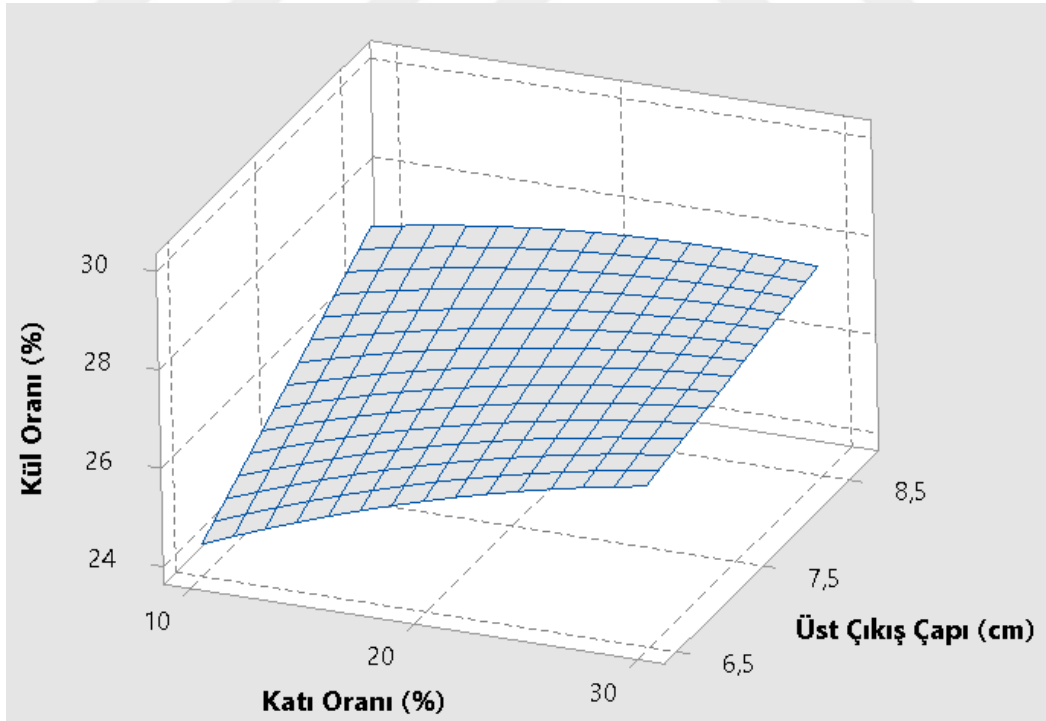
Şekil 3.11 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına etkisi

Besleme basıncı arttıkça, siklonun yapısı gereği üst çıkışa giden malzeme miktarı da artmaktadır. Bu nedenle yüksek yoğunluklu malzemenin bir kısmı da üst çıkışa doğru yönelerek temiz kömür miktarını ve kül oranını arttırmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde bulunan çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Wang vd., 2020; Abbas ve Muhammad, 2016).



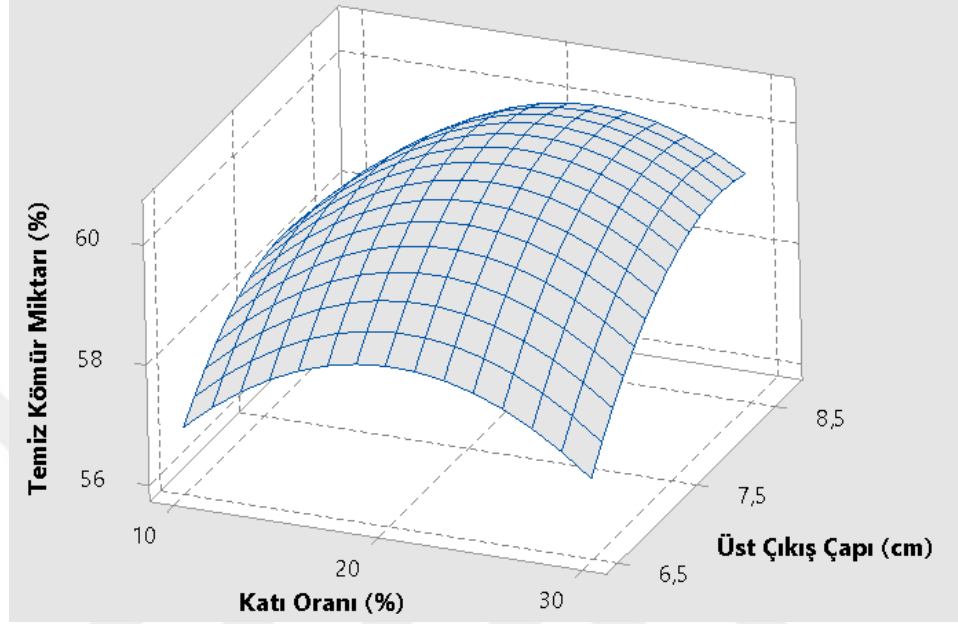
Şekil 3.12 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür miktarına etkisi

3.1.2.2 Katı oranı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi



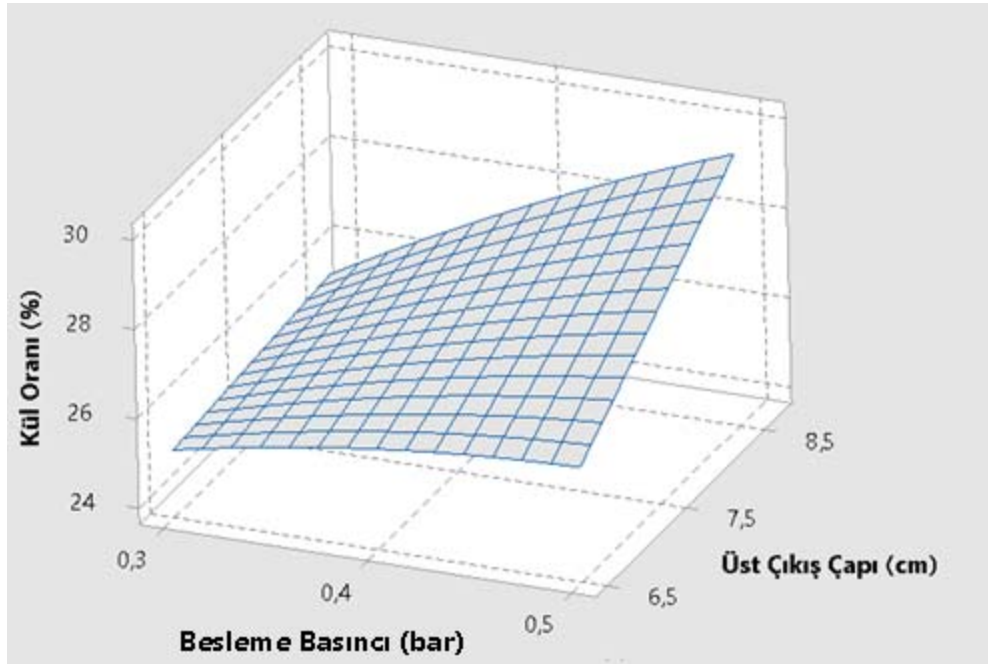
Şekil 3.13 Katı oranı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi

Üst çıkış çapı arttıkça, siklondaki hacimsel akış üst akıma doğru artmaktadır. Bu nedenle beslenen suyun büyük bir bölümü üst çıkışından çıkmaktadır. Üst çıkışa doğru artan bu akış beraberinde daha ağır taneleri de sürükleyerek kül oranını arttırmaktadır.



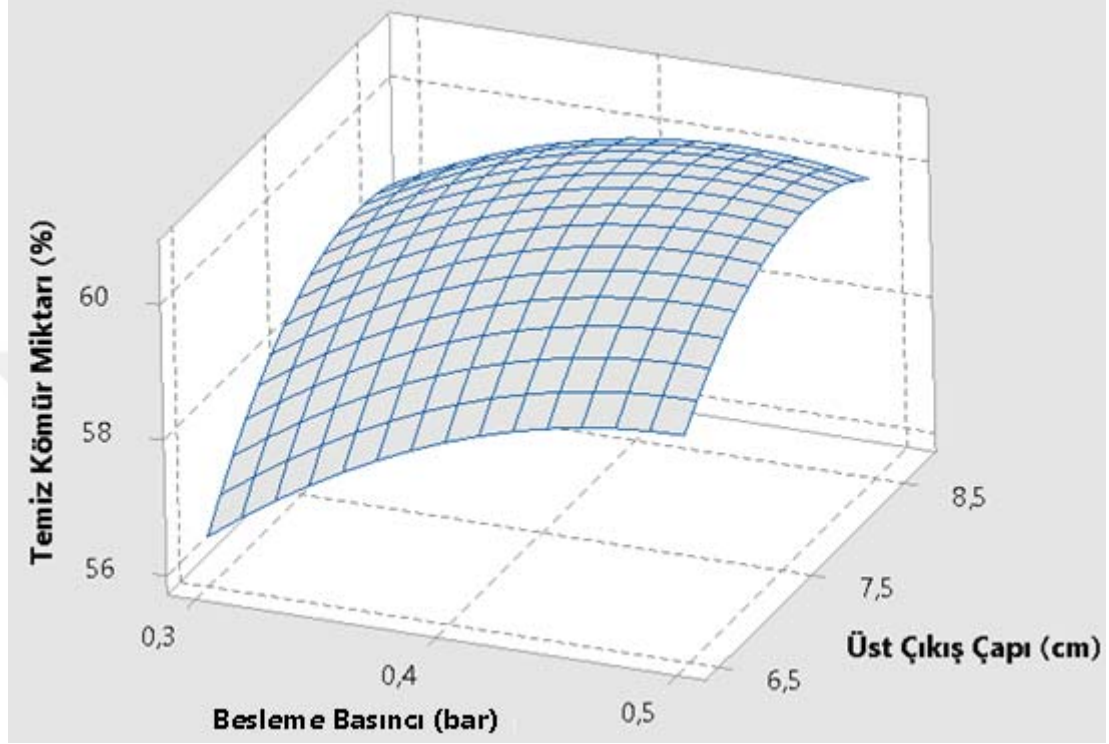
Şekil 3.14 Kati oranı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi

3.1.2.3 Besleme Basıncı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi



Şekil 3.15 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi

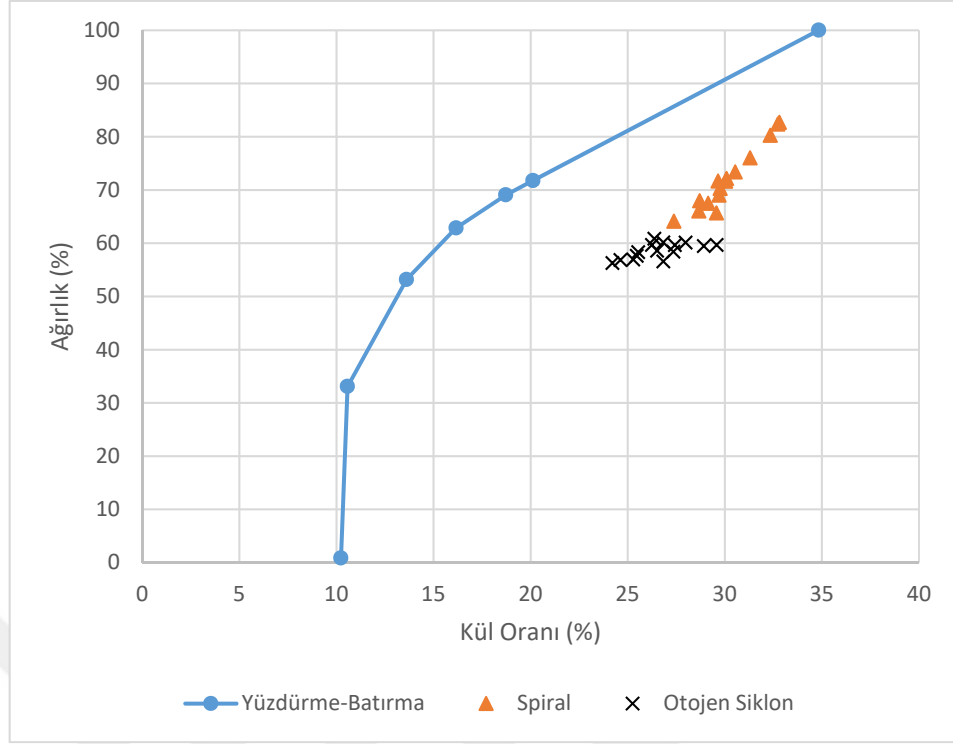
Besleme basıncı ve üst çıkış çapı arttıkça temiz kömür miktarı ve kül oranı artmaktadır. Bu iki parametre arttıkça üst akıma giden malzeme miktarı artmakta ve üst çıkışa daha fazla malzeme sürüklenmesine sebep olmaktadır.



Şekil 3.16 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi

3.1.3 Aydın Kömürü Spiral ve Otojen Siklonun Karşılaştırılması

Aydın bölgesine ait kömür kullanılarak yapılan çalışmada, spiral ve otojen siklon ile zenginleştirme olanakları incelenmiştir. Deney sonuçları ve yüzdürme-batırma testi karşılaştırılmıştır (Şekil 3.17). Sonuçlara bakıldığında otojen siklonun ile daha düşük kül oranları elde edilmiştir. Spiralde ise daha yüksek kül oranları ve yüksek kömür kazanım oranları elde edilmiştir. Bazı deney sonuçlarında aynı temiz kömür kül oranlarında ürün alınmıştır. Bu deneylerde spiralin ağırlıkça temiz kömür miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Kömür yıkanabilirliği zor olması sebebiyle, her iki cihaz da iyi bir performans göstermemiştir. Bu nedenle, bu kömürle daha fazla çalışma yapmaya gerek görülmemiştir. Elde edilen sonuçlarda, kömür yıkanabilirliğinin kötü olması en büyük etkidir.



Şekil 3.17 Deney sonuçlarının yüzdürme batırma testi ile karşılaştırılması

3.2 Soma Kömürü ile Yapılan Zenginleştirme Çalışmaları

Tez çalışması kapsamında, Soma bölgesine ait linyit kömürünün otojen siklon ve spiral ile zenginleştirilme olanakları araştırılmıştır. Her iki cihaz için, literatür araştırması yapıldıktan sonra parametreler ve seviyeleri belirlenmiştir. – 1mm kömür numunesi hazırlandıktan sonra cihaz parametreleri ayarlanmış ve deneyler yapılmıştır.

3.2.1 Soma Kömürü Spiral ile Zenginleştirme Deneyleri

Minitab 17 programı kullanılarak, Box-Behnken tasarımı ile deney programı hazırlanmıştır (Tablo 3.9). Deney tasarımına bağlı 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.9 Soma kömürü spiral için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
A	Katı oranı	(%)	15	20	25
B	Besleme hızı	(lt/dk)	32	40	48
C	Ayırıcı açıklığı	(cm)	3	6	9

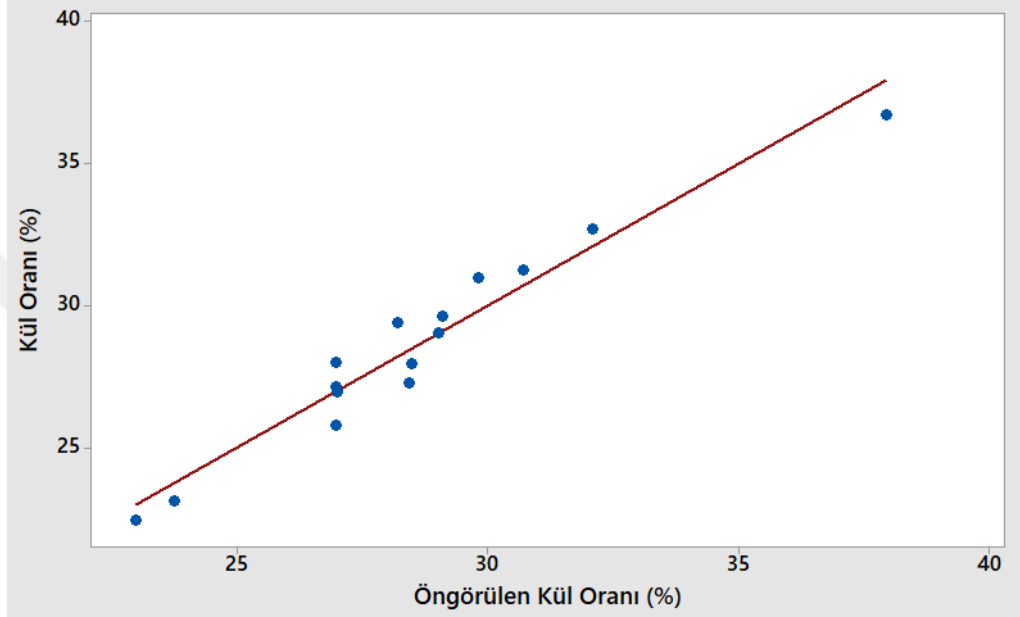
Tablo 3.10 Soma kömürü spiral deney sonuçları

Deney No	Katı Oranı (%) A	Besleme Hızı (L/dk) B	Ayırıcı Açıklığı (cm) C	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	15	32	6	26,98	27,02	49,22	48,33
2	20	40	6	25,80	27,00	51,66	53,52
3	15	40	9	31,28	30,71	59,50	59,79
4	15	48	6	32,73	32,10	61,56	60,99
5	20	48	3	29,65	29,11	55,97	55,36
6	20	40	6	27,15	27,00	53,81	53,52
7	25	48	6	29,05	29,02	56,03	56,92
8	20	40	6	28,04	27,00	55,08	53,52
9	20	32	3	29,42	28,22	51,78	51,48
10	20	48	9	36,75	37,94	73,00	73,29
11	15	40	3	27,29	28,45	49,32	50,50
12	25	32	6	23,12	23,75	47,58	48,16
13	25	40	3	22,43	23,00	46,85	46,57
14	25	40	9	30,98	29,82	60,67	59,49
15	20	32	9	27,95	28,48	55,15	55,76

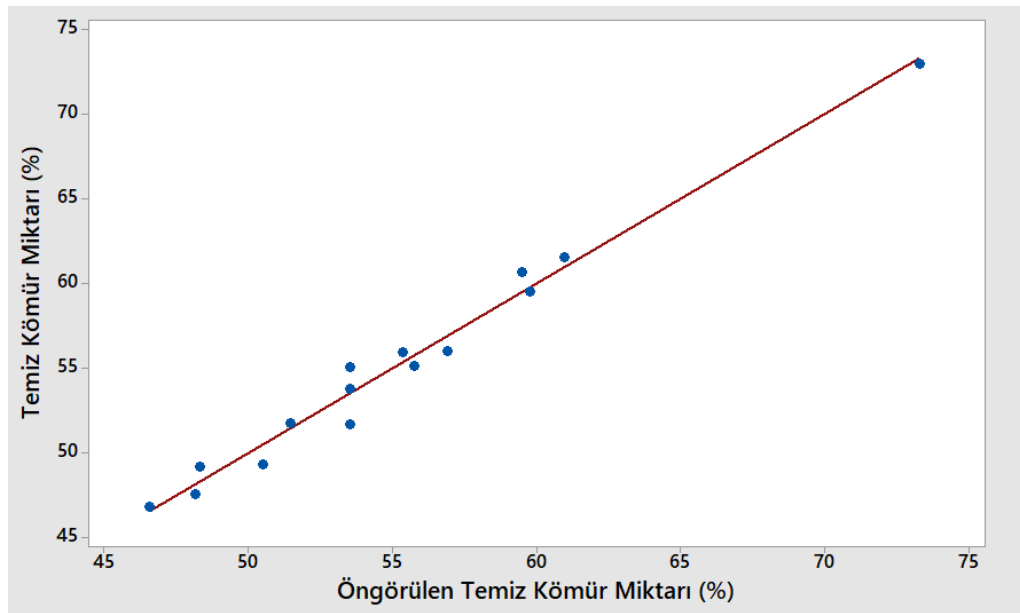
Tablo 3.10’da parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.5 ve 3.6’da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Kül oranı (\%)} = & 88,5 + 0,76 A - 2,69 B - 6,97 C - 0,0394 A*A + 0,0307 B*B \\ & + 0,2203 C*C + 0,0011 A*B + 0,0758 A*C + 0,0892 B*C \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Temiz kömür miktarı (\%)} = & 77,4 + 4,24 A - 2,80 B - 9,01 C - 0,0961 A*A \\ & + 0,0388 B*B + 0,3300 C*C - 0,0243 A*B + 0,0606 A*C + 0,1422 B*C \end{aligned} \quad (3.6)$$



Şekil 3.18 Spiral temiz kömür kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 3.19 Spiral temiz kömür miktarı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Deney sonuçları ve eşitlik 3.5 ve 3.6'dan oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.18 ve 3.19'da verilmektedir. R^2 değerleri kül oranı için %94,44 ve temiz kömür miktarı için %98,08 olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.11 Soma kömürü spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	171,196	19,022	9,440	0,012
A	1	20,139	20,139	9,990	0,025
B	1	53,577	53,577	26,580	0,004
C	1	41,288	41,288	20,490	0,006
A*A	1	3,580	3,580	1,780	0,240
B*B	1	14,209	14,209	7,050	0,045
C*C	1	14,518	14,518	7,200	0,044
A*B	1	0,008	0,008	0,000	0,952
A*C	1	5,175	5,175	2,570	0,170
B*C	1	18,348	18,348	9,100	0,030
Lack-of-fit	3	7,534	2,511	1,980	0,353
Pure error	2	2,543	1,271		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,353 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri (A,B,C) Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Model için en önemli parametreyi F değeri belirlemektedir. F değerinin yüksek olması parametrenin model üzerindeki etkisinin

daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. F değeri incelendiğinde $B > C > A$ olduğu görülmektedir.

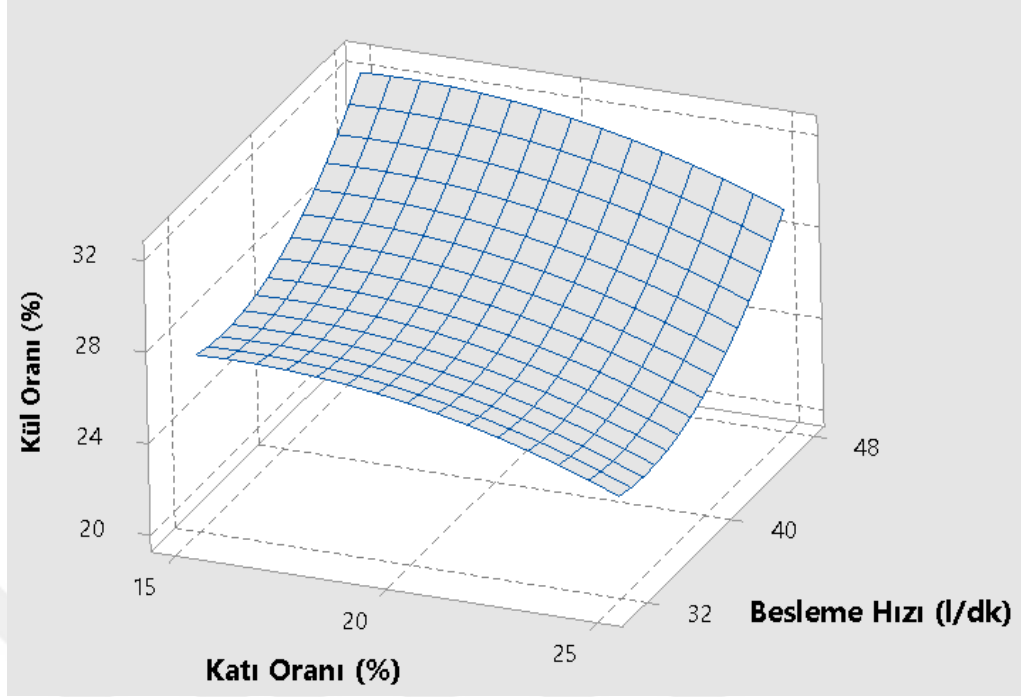
Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05’den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05’den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ana parametrelerin model üzerindeki etkisi incelendiğinde, katı oranı Prob>F değeri 0,05’den büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle model için anlamsızdır.

Tablo 3.12 Soma kömürü spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

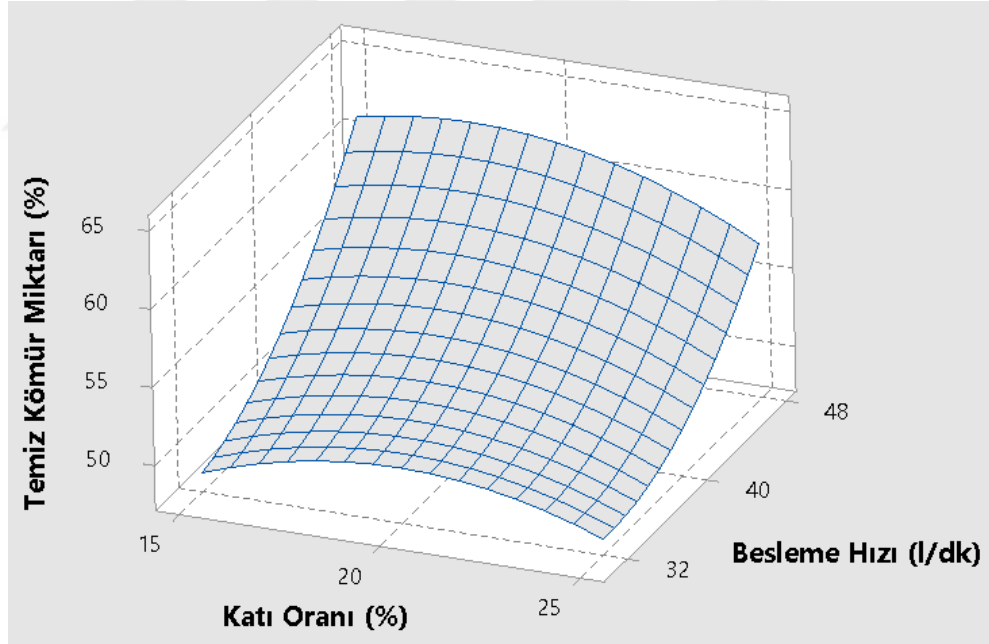
	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	619,188	68,799	28,440	0,001
A	1	8,968	8,968	3,710	0,112
B	1	229,262	229,262	94,770	0,000
C	1	246,640	246,640	101,950	0,000
A*A	1	21,331	21,331	8,820	0,031
B*B	1	22,801	22,801	9,420	0,028
C*C	1	32,567	32,567	13,460	0,014
A*B	1	3,782	3,782	1,560	0,266
A*C	1	3,307	3,307	1,370	0,295
B*C	1	46,620	46,620	19,270	0,007
Lack-of-fit	3	6,128	2,043		0,639
Pure error	2	5,968	2,984		

3.2.1.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi

Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi Şekil 3.20’de ve temiz kömür miktarına etkisi Şekil 3.21’de gösterilmektedir.



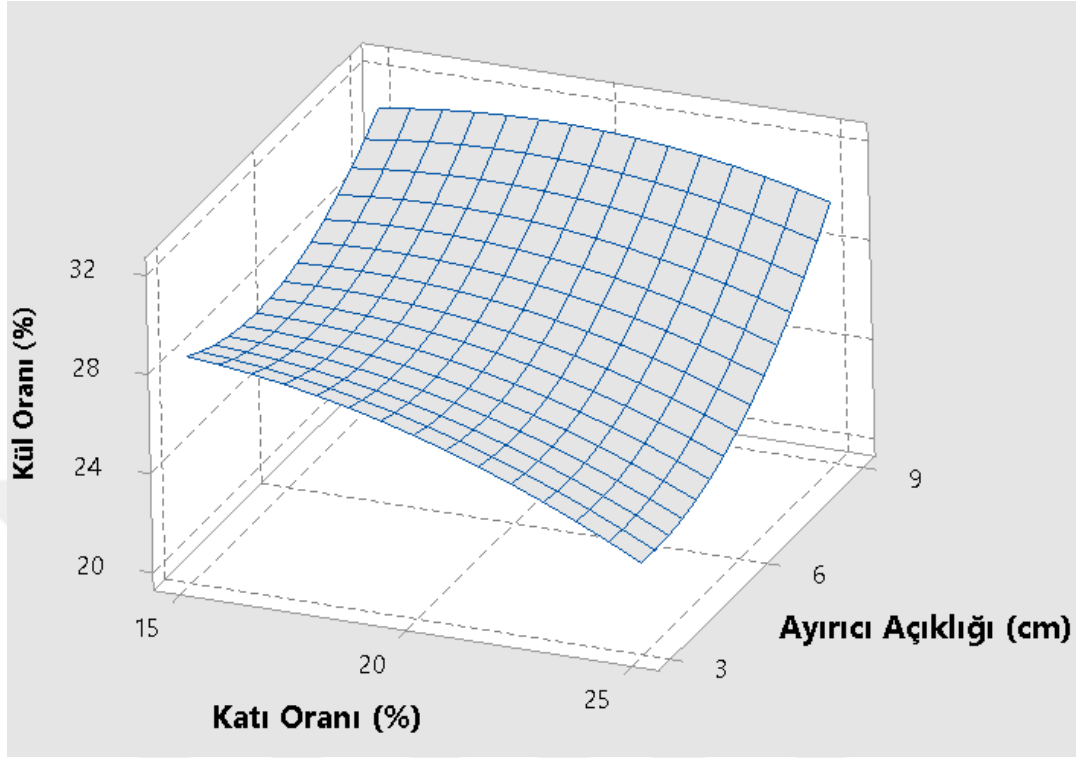
Şekil 3.20 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi



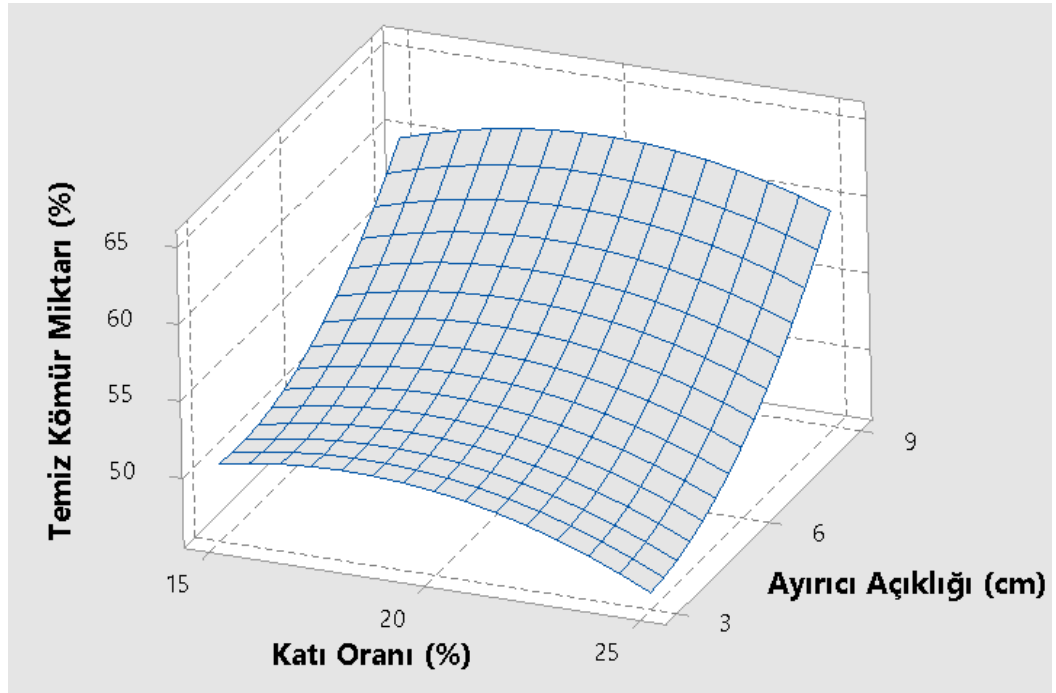
Şekil 3.21 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi

Katı oranı arttıkça kül oranı bir miktar düşmektedir. Katı oranının temiz kömür miktarına etkisi incelendiğinde ise, bu parametrenin oluşturulan model üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir.

3.2.1.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi



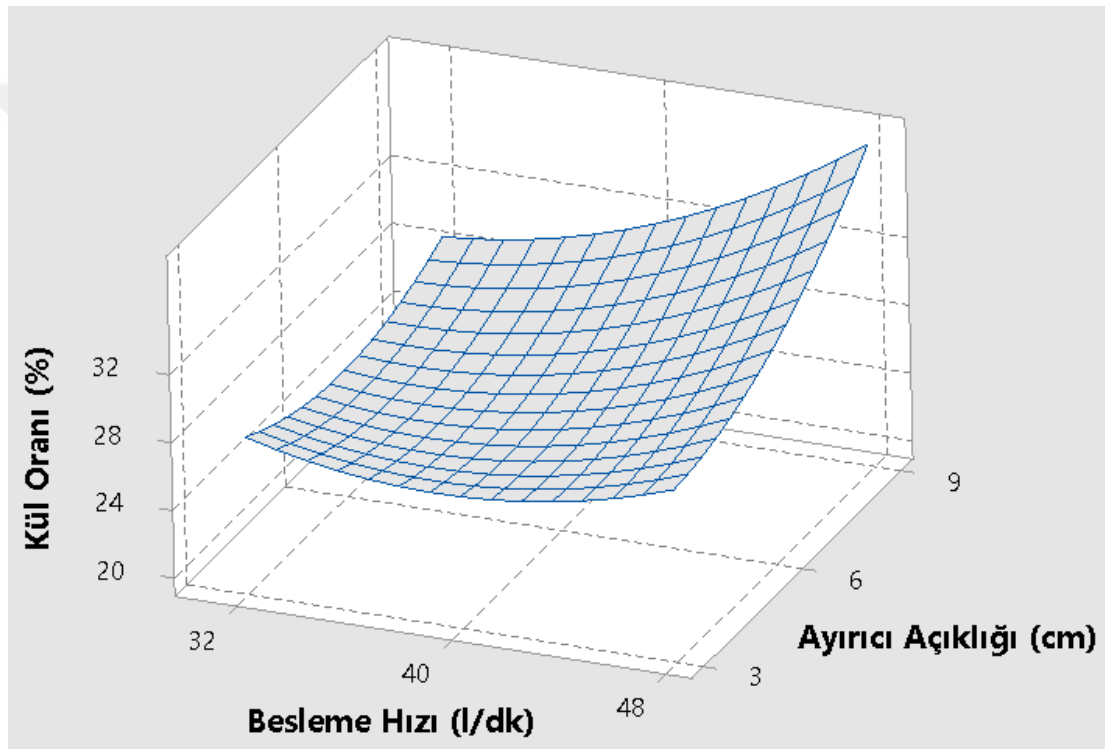
Şekil 3.22 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi



Şekil 3.23 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

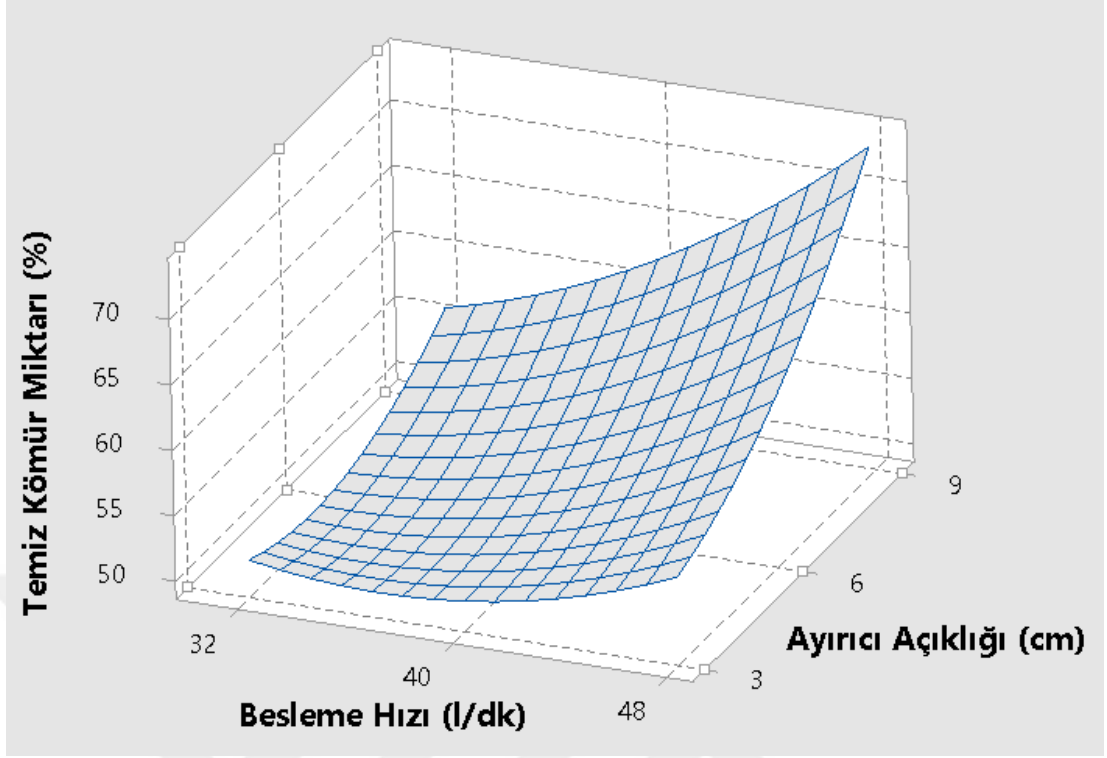
Ayırıcı açıklığı arttıkça kül oranının arttığı görülmektedir. Spiral yüzeyinde malzeme merkezde yoğunluğu fazla ve kenarlarda hafif taneler olacak şekilde hareket etmektedir. Bu nedenle ayırıcı açıklığının artması, spiral kenarı ile merkezi arasındaki daha büyük bir alanı taradığından yoğunluğu fazla olan ara ürünlerinde temiz kömür çıkışıdan alınmasına neden olarak kül oranını ve temiz kömür miktarını arttırmaktadır.

3.2.1.3 Besleme Hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi



Şekil 3.24 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi

Besleme hızı arttıkça temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı artmaktadır. Besleme hızının artmasıyla spiral yüzeyindeki pülp hızı artmakta ve ağır tanelerin bir kısmını da hafif tanelerle birlikte spiral çeperine doğru sürüklemektedir. Bu nedenle daha fazla malzeme temiz kömür çıkışına gitmekte ve ağırlıkça temiz kömür miktarını arttırmaktadır. Aynı zamanda temiz kömür çıkışına giden ağır taneler nihai ürün kül oranını arttırmaktadır.



Şekil 3.25 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

3.2.2 Soma Kömürü Otojen Siklon ile Zenginleştirme Deneyleri

Otojen siklonda katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapının zenginleştirmeye olan etkisini araştırmak için Minitab 17 programı kullanılarak, Box-Behnken tasarımı ile deney programı hazırlanmıştır (Tablo 3.13). Deney tasarımına bağlı 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.13 Soma kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
X	Katı oranı	(%)	10	20	30
Y	Besleme basıncı	(bar)	0,3	0,4	0,5
Z	Üst çıkış çapı	(cm)	6,5	7,5	8,5

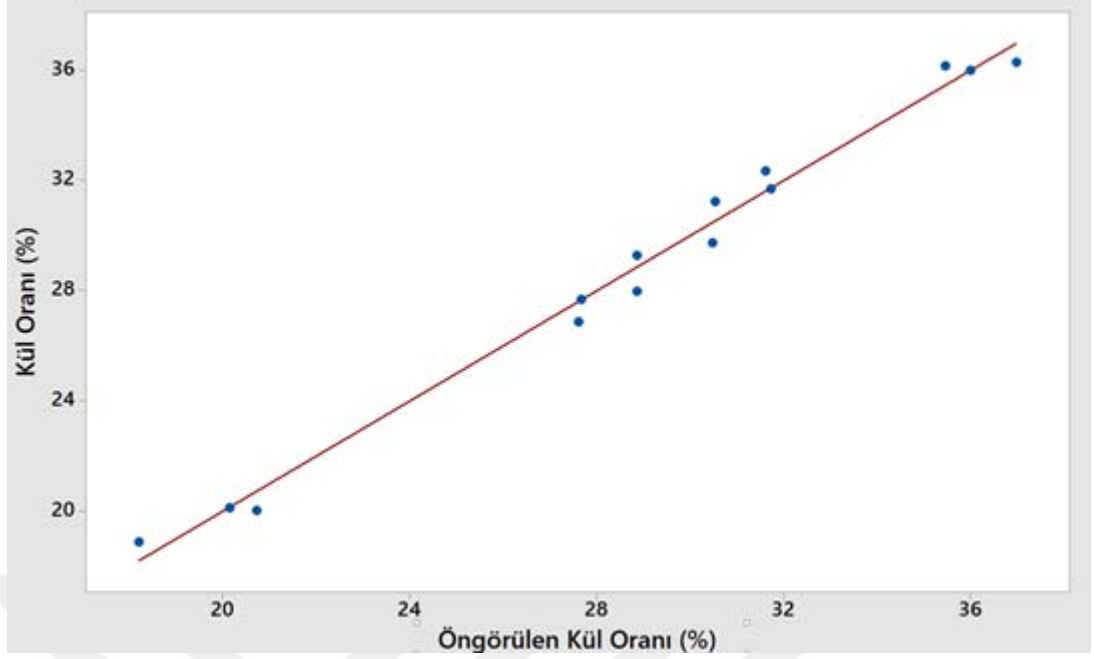
Tablo 3.14 Soma kömürü otojen siklon deney sonuçları

Deney No	Katı Oranı (%) X	Besleme basıncı (bar) Y	Üst çıkış çapı (cm) Z	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	10	0,4	6,5	18,89	18,19	38,62	37,18
2	10	0,5	7,5	27,68	27,66	55,49	55,29
3	20	0,3	6,5	20,02	20,72	34,56	35,53
4	20	0,5	8,5	36,15	35,45	72,74	71,77
5	30	0,3	7,5	31,69	31,71	52,74	52,94
6	20	0,4	7,5	27,99	28,86	52,87	54,22
7	30	0,4	6,5	32,33	31,61	56,28	55,10
8	20	0,4	7,5	29,29	28,86	54,35	54,22
9	10	0,3	7,5	20,14	20,14	36,98	37,45
10	20	0,4	7,5	29,29	28,86	55,43	54,22
11	20	0,5	6,5	26,88	27,60	51,50	53,15
12	20	0,3	8,5	31,24	30,52	56,61	54,96
13	30	0,5	7,5	35,99	36,00	70,00	69,53
14	10	0,4	8,5	29,75	30,47	58,08	59,26
15	30	0,4	8,5	36,28	18,19	69,62	37,18

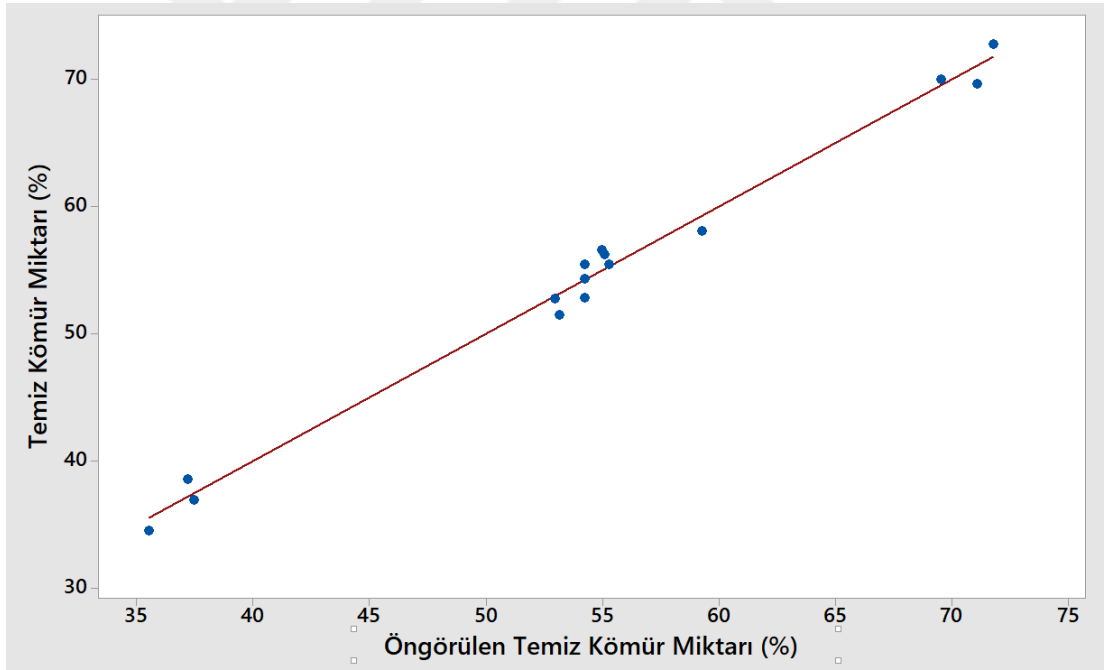
Tablo 3.14’de parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.7 ve 3.8’de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Kül Oranı (\%)} = & -73,0 + 1,966 X + 111,1 Y + 8,67 Z + 0,00379 X*X - 36,1 Y*Y \\ & + 0,077 Z*Z - 0,810 X*Y - 0,1728 X*Z - 4,88 Y*Z \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Temiz Kömür Miktarı (\%)} = & -71,1 + 1,739 X + 196 Y + 2,3 Z + 0,00692 X*X \\ & - 110,6 Y*Y + 0,742 Z*Z - 0,313 X*Y - 0,1530 X*Z - 2,03 Y*Z \end{aligned} \quad (3.8)$$



Şekil 3.26 Otojen siklon kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 3.27 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Deney sonuçları (Tablo 3.14) ve eşitlik 3.7 ve 3.8'den oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.26 ve 3.27'de verilmektedir. R^2 değerleri kül oranı için %98,84 ve temiz kömür miktarı

için %98,99 olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.15 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	44,373	4,8930	47,400	0,000
X	1	198,304	198,304	192,100	0,000
Y	1	36,679	36,679	67,500	0,000
Z	1	155,761	155,761	150,880	0,000
X*X	1	0,531	0,531	0,510	0,505
Y*Y	1	0,481	0,481	0,470	0,525
Z*Z	1	0,022	0,022	0,020	0,890
X*Y	1	2,624	2,624	2,540	0,172
X*Z	1	11,937	11,937	11,560	0,018
Y*Z	1	0,951	0,951	0,920	0,381
Lack-of-fit	3	4,035	1,345	2,390	0,309
Pure error	2	1,127	0,563		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır (Tablo 3.14). Modelin Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,959 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri (X,Y,Z) Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Ana parametreler olan katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapı için F değeri, sırasıyla 192,1, 67,5 ve 150,88 olarak bulunmuştur. Buna göre parametrelerin önem sırası $X > Z > Y$ olarak belirtilebilir.

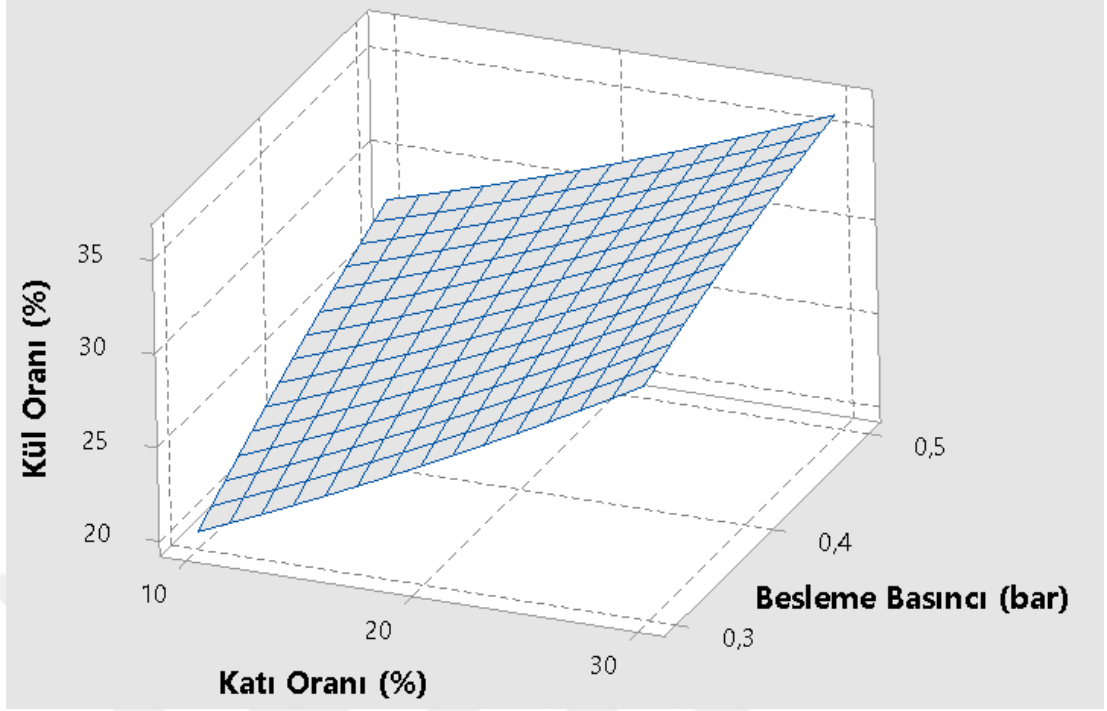
Tablo 3.16 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F-Değeri	Prob>F
Model	9	1777,060	197,451	54,510	0,000
X	1	442,090	442,090	122,040	0,000
Y	1	592,370	592,370	163,520	0,000
Z	1	723,710	723,710	199,780	0,000
X*X	1	1,770	1,770	0,490	0,516
Y*Y	1	4,520	4,520	1,250	0,315
Z*Z	1	2,030	2,030	0,560	0,488
X*Y	1	0,390	0,390	0,110	0,756
X*Z	1	9,360	9,360	2,580	0,169
Y*Z	1	0,160	0,160	0,050	0,840
Lack-of-fit	3	14,810	4,936	2,990	0,261
Pure error	2	3,300	1,652		

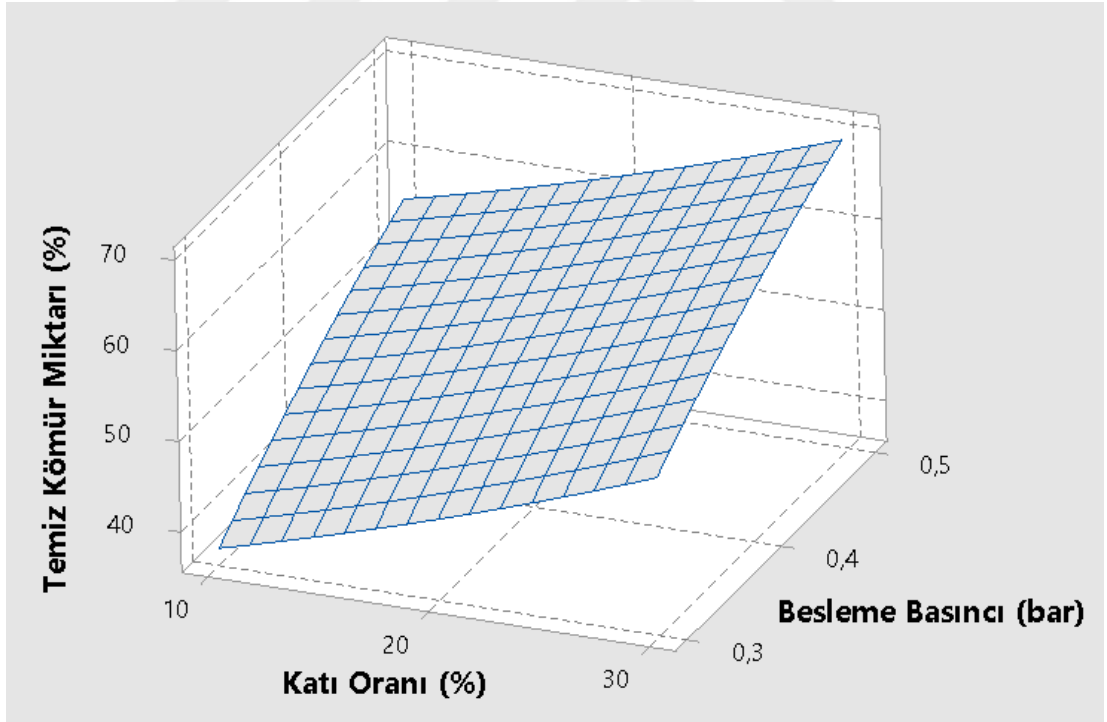
Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05'den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ana parametrelerin Prob>F değerinin 0,05'den düşük olması sebebiyle oluşturulan model için anlamlıdır. Parametrelerin önem sırası Z>Y> X olarak belirtilebilir.

3.2.2.1 Katı oranı ve Besleme Basıncının Etkisi

Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına ve temiz kömür miktarına etkisi gösterilmektedir (Şekil 28-29). Katı oranı ve besleme basıncı arttıkça temiz kömür kül oranı ve miktarı artmaktadır. Katı oranının artmasıyla siklon içerisinde oluşan ortamın yoğunluğu da artmakta ve temiz kömür çıkışından daha yüksek küllü kömür elde edilmektedir.

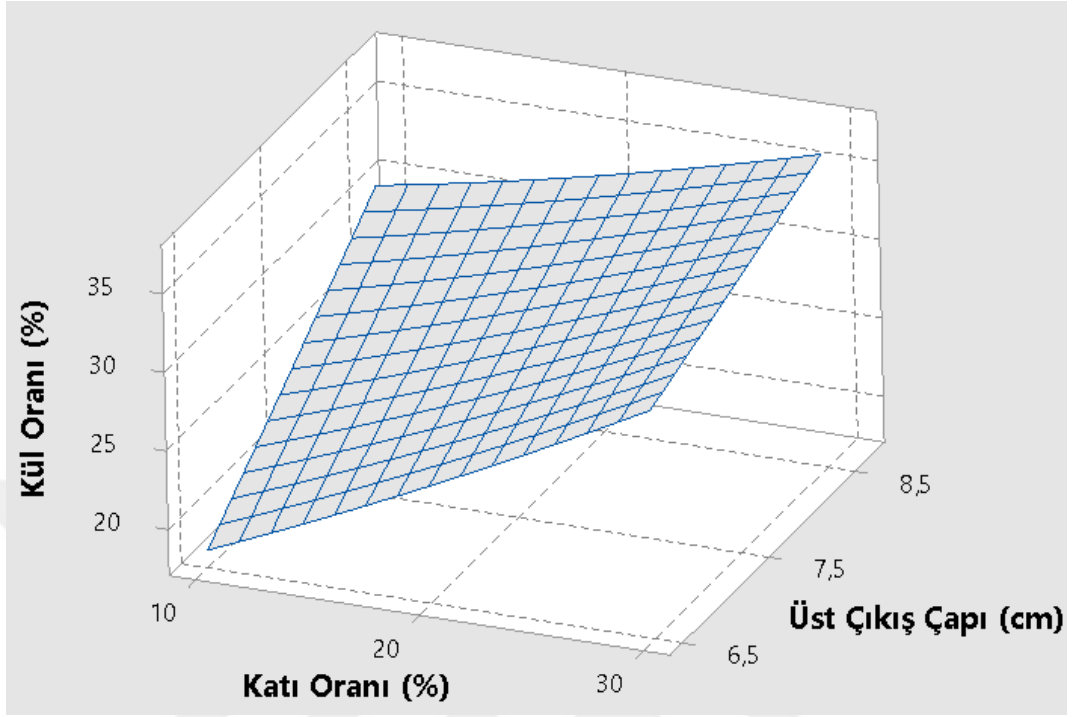


Şekil 3.28 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür kül oranına etkisi

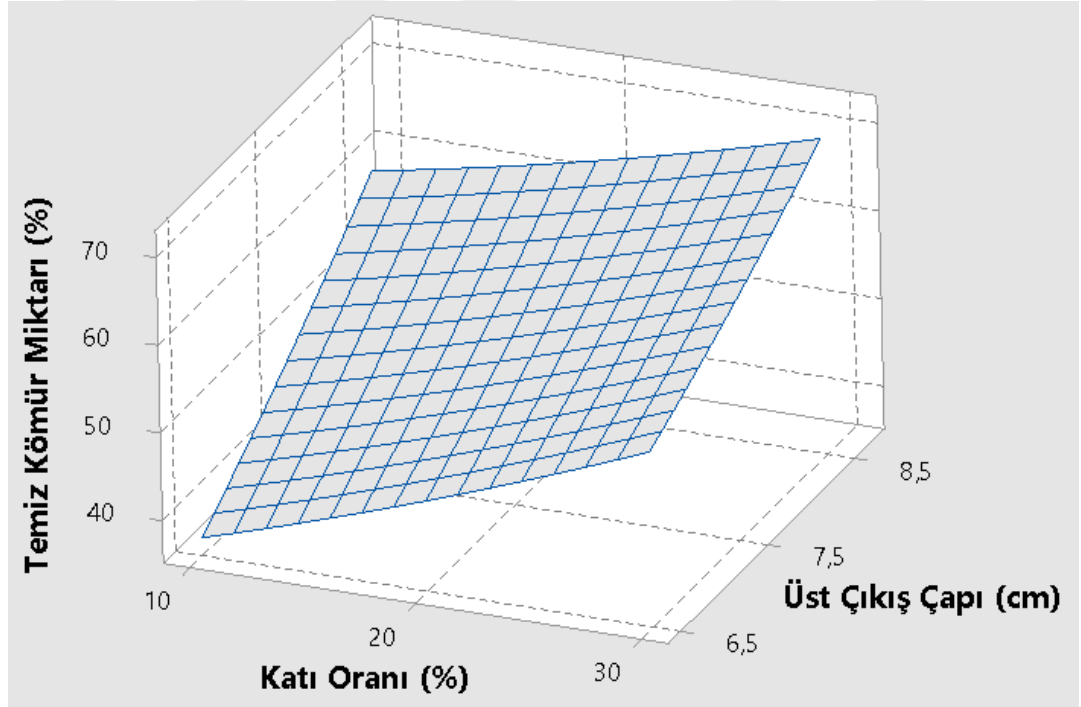


Şekil 3.29 Katı oranı ve besleme basıncının temiz kömür miktarına etkisi

3.2.2.2 Katı oranı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi



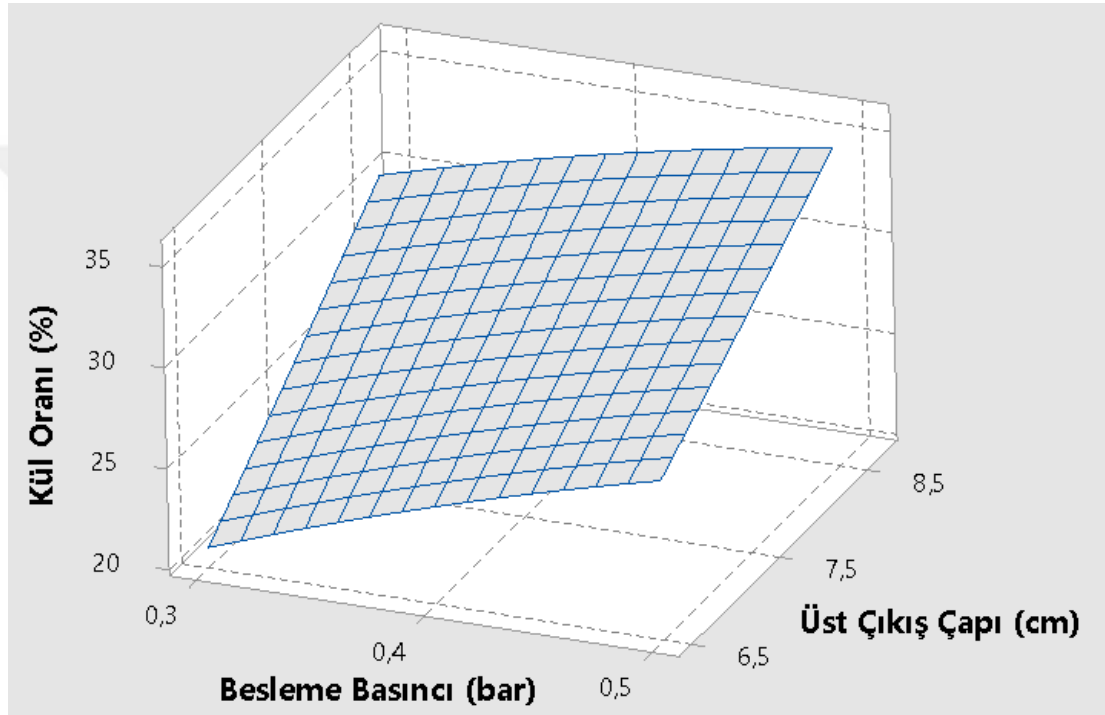
Şekil 3.30 Katı oranı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi



Şekil 3.31 Katı oranı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi

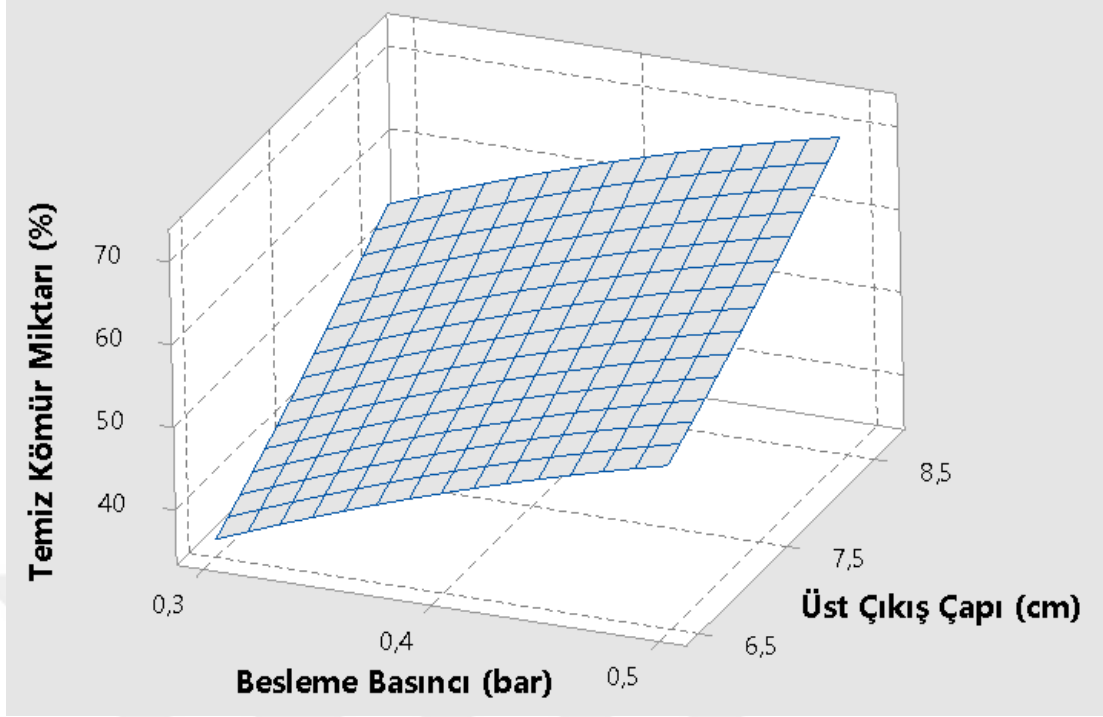
Üst çıkış çapı arttıkça, siklondaki hacimsel akış üst akıma doğru artmaktadır. Bu nedenle beslenen suyun büyük bir bölümü üst çıkışından çıkmaktadır. Üst çıkışa doğru artan bu akış beraberinde daha ağır taneleri de sürükleyerek kül oranını arttırmaktadır. Daha önceki çalışmalarda benzer etkiler gözlemlenmiştir (Maharana ve Suresh, 2021; Hembron ve Suresh, 2018).

3.2.2.3 Besleme Basıncı ve Üst Çıkış Çapının Etkisi



Şekil 3.32 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının kül oranına etkisi

Besleme basıncı arttıkça, siklonun yapısı gereği üst çıkışa giden malzeme miktarı da artmaktadır. Bu nedenle yüksek yoğunluklu malzemenin bir kısmı da üst çıkışa doğru yönelerek temiz kömür miktarını ve kül oranını arttırmaktadır. Besleme basıncı ve üst çıkış çapı arttıkça temiz kömür miktarı ve kül oranı artmaktadır. Bu iki parametre arttıkça üst akıma giden malzeme miktarı artmakta ve üst çıkışa daha fazla malzeme sürüklenmesine sebep olmaktadır. Bu parametrelerin etkisi daha önceki çalışmaları doğrular niteliktedir (Majumder ve Barnwall, 2011).



Şekil 3.33 Besleme basıncı ve üst çıkış çapının temiz kömür miktarına etkisi

3.2.3 Soma Kömürü Otojen Siklon Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Otojen siklonda katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapı ile deneyler yapıldıktan sonra optimum parametreler belirlenmiştir. Sonrasında tasarım parametrelerinin belirlenmesi için siklon gövde uzunluğu, üst çıkış dalma derinliği ve konik açısı ile deneyler yapılmıştır. Minitab 17 programı ve Box-Behnken tasarımı ile deney programı hazırlanmış ve 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.17 Soma kömürü otojen siklon için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
K	Siklon gövde uzunluğu	(cm)	27	29	31
L	Üst çıkış borusu dalma derinliği	(cm)	20	22	24
M	Konik açısı	(°)	120	140	160

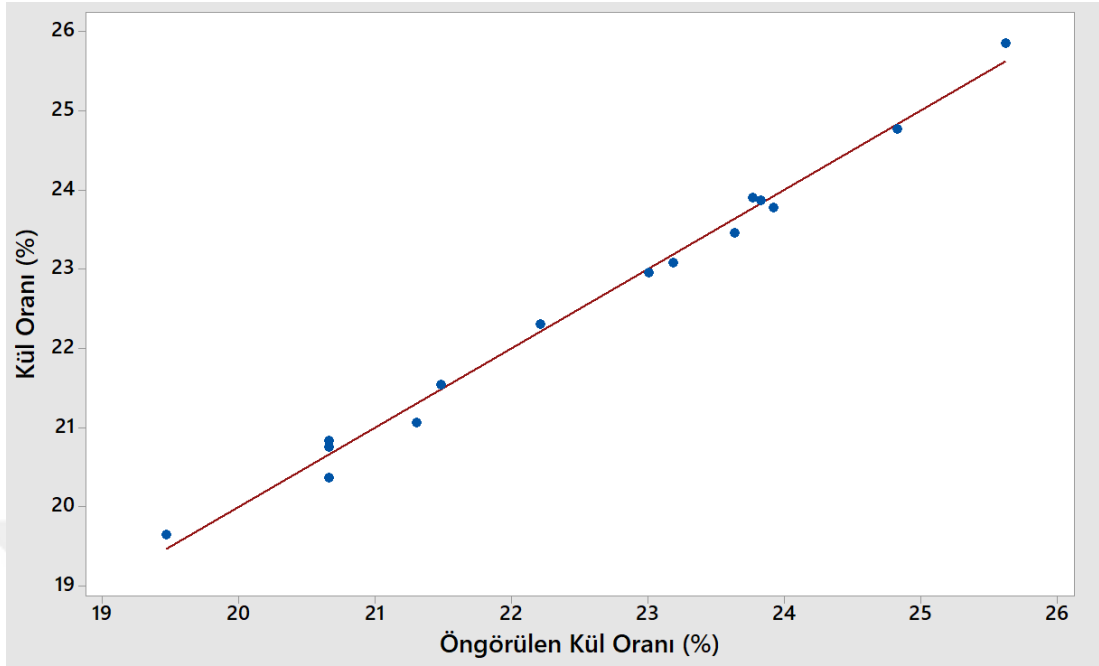
Tablo 3.18 Soma kömürü otojen siklon deney sonuçları

Deney No	Siklon gövde uzunluğu (cm) K	Üst çıkış dalma derinliği (cm) L	Konik açı (°) M	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	31	22	120	22,96	23,00	42,48	41,73
2	27	22	120	21,06	21,30	40,58	40,35
3	29	24	120	22,31	22,21	38,46	38,10
4	29	22	140	20,84	20,66	38,91	38,53
5	31	20	140	23,78	23,92	40,89	40,30
6	27	20	140	21,54	21,48	37,30	36,19
7	31	22	160	25,86	25,62	45,22	45,45
8	31	24	140	24,77	24,82	46,65	47,76
9	29	22	140	20,76	20,66	37,56	38,53
10	27	22	160	23,86	23,82	32,76	33,51
11	29	22	140	20,37	20,66	39,11	38,53
12	29	24	160	23,46	23,63	41,65	40,31
13	29	20	160	23,09	23,18	31,28	31,64
14	29	20	120	19,65	19,47	35,61	36,95
15	27	24	140	23,90	23,76	37,95	38,54

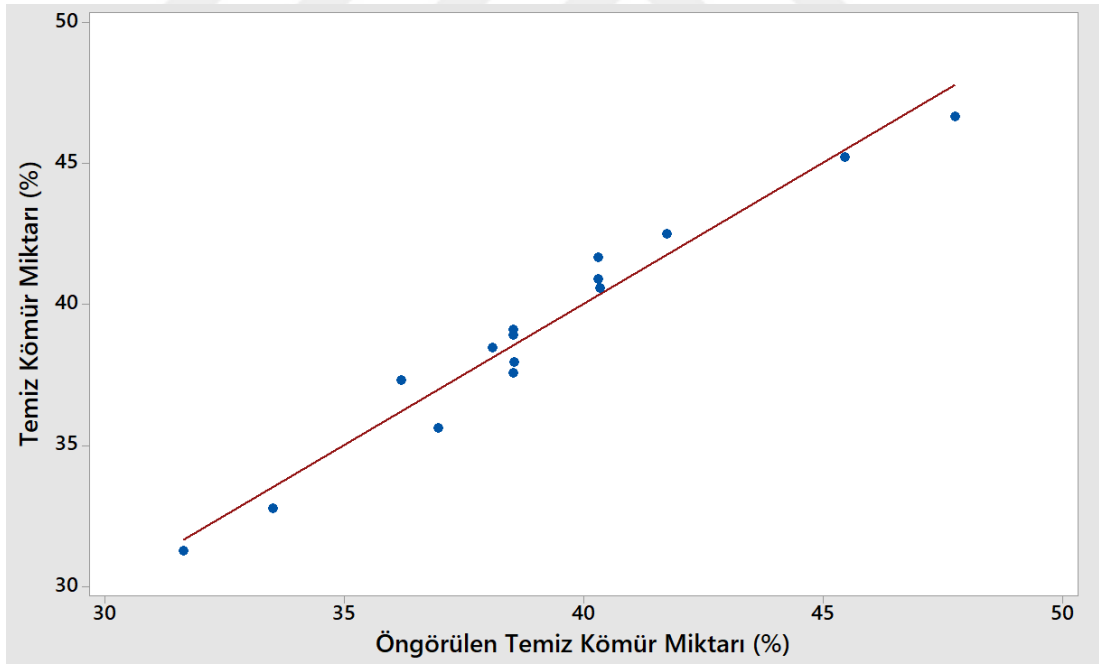
Tablo 3.18’de parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.9 ve 3.10’da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Kül Oranı (\%)} = & 456,9 - 27,86 K - 3,49 L - 0,131 M + 0,5191 K*K + 0,1907 L*L \\ & + 0,001759 M*M - 0,0861 K*L + 0,00059 K*M - 0,01431 L*M \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Temiz Kömür Miktarı (\%)} = & 1047 - 55,8 K - 7,25 L - 2,212 M + 0,710 K*K \\ & - 0,167 L*L - 0,00277 M*M + 0,319 K*L + 0,0660 K*M + 0,0470 L*M \end{aligned} \quad (3.8)$$



Şekil 3.34 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 3.35 Otojen siklon temiz kömür sonuçları ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Deney sonuçları (Tablo 3.18) ve eşitlik 3.9 ve 3.10'dan oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.34 ve 3.35'de verilmektedir. R^2 değerleri kül oranı için %99,17 ve temiz kömür miktarı

için %95,94 olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.19 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	44,446	4,938	66,440	0,000
K	1	6,128	6,128	82,440	0,000
L	1	5,094	5,094	68,540	0,000
M	1	13,232	13,232	178,010	0,000
K*K	1	15,918	15,918	214,140	0,000
L*L	1	2,149	2,149	28,910	0,003
M*M	1	1,828	1,828	24,590	0,004
K*L	1	0,474	0,474	6,380	0,053
K*M	1	0,002	0,002	0,030	0,869
L*M	1	1,311	1,311	17,630	0,008
Lack-of-fit	3	0,245	0,082	1,290	0,464
Pure error	2	0,127	0,063		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır (Tablo 3.20). Modelin Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri ve karesel etkiler Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Parametrelerin önem sırası $K*K > M > K > L > L*L > M*M$ olarak belirtilebilir.

Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05'den küçük

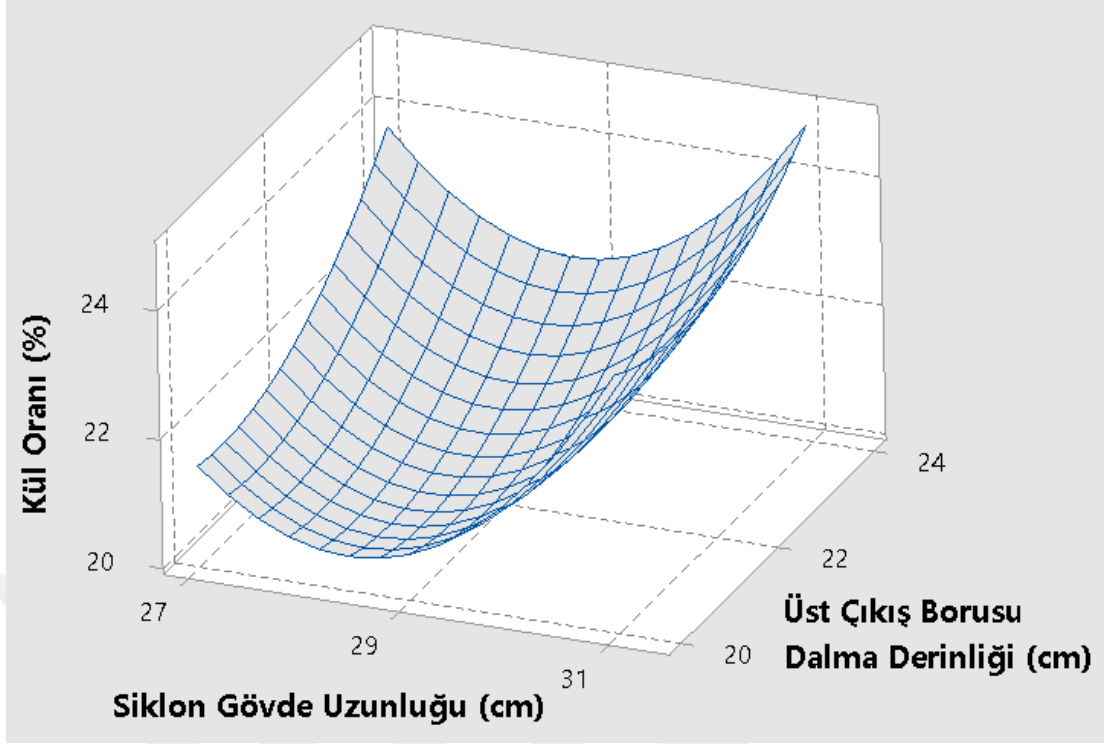
olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05’den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.20 Soma kömürü otojen siklon temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

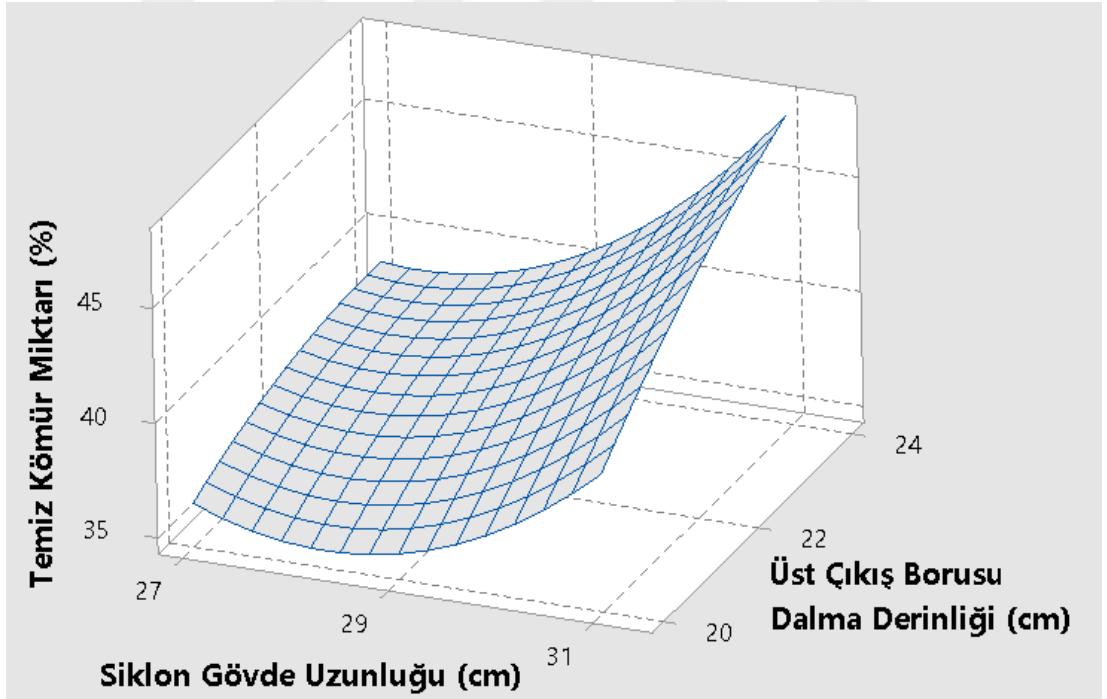
	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	228,991	25,443	13,120	0,006
K	1	88,778	88,778	45,790	0,001
L	1	48,167	48,167	24,840	0,004
M	1	4,836	4,836	2,490	0,175
K*K	1	29,789	29,789	15,360	0,011
L*L	1	1,655	1,655	0,850	0,398
M*M	1	4,525	4,525	2,330	0,187
K*L	1	6,528	6,528	3,370	0,126
K*M	1	27,878	27,878	14,380	0,013
L*M	1	14,138	14,138	7,290	0,043
Lack-of-fit	3	8,273	2,758	3,880	0,212
Pure error	2	1,422	0,711		

3.2.3.1 Siklon Gövde Uzunluğu ve Üst Çıkış Borusu Dalma Derinliğinin Etkisi

Siklon gövde uzunluğu arttıkça kül oranı bir miktar düşmekte ve sonrasında tekrar artmaktadır (Şekil 3.36). Bunun sebebi siklon uzunluğunun artmasıyla malzeme siklon içerisinde daha uzun süre kalması ve ayırma veriminin artmasıdır. Kül oranının bir noktadan sonra artması ise, siklon uzunluğunun fazla artmasıyla üst çıkış borusu ve otojen ortam arasındaki mesafenin çok fazla olması ve beslenen malzemenin bir kısmının zenginleştirilmeden üst çıkışa doğru yönelmesidir.

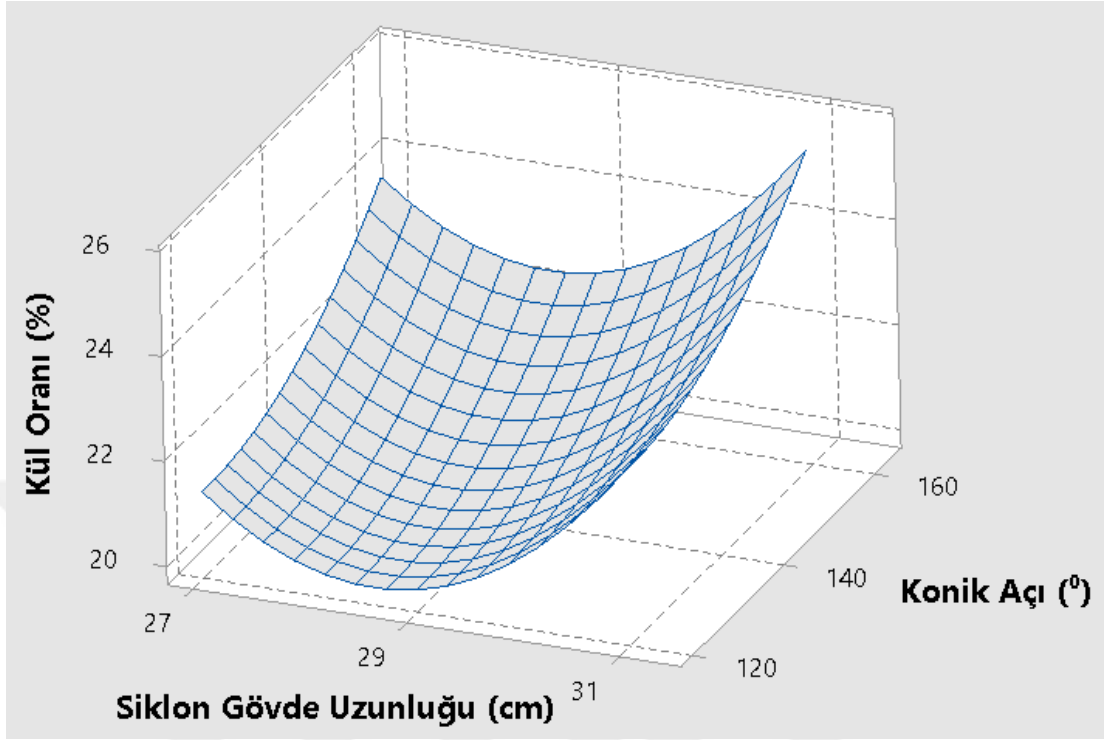


Şekil 3.36 Siklon gövde uzunluğu ve üst çıkış borusu dalma derinliğinin kül oranına etkisi

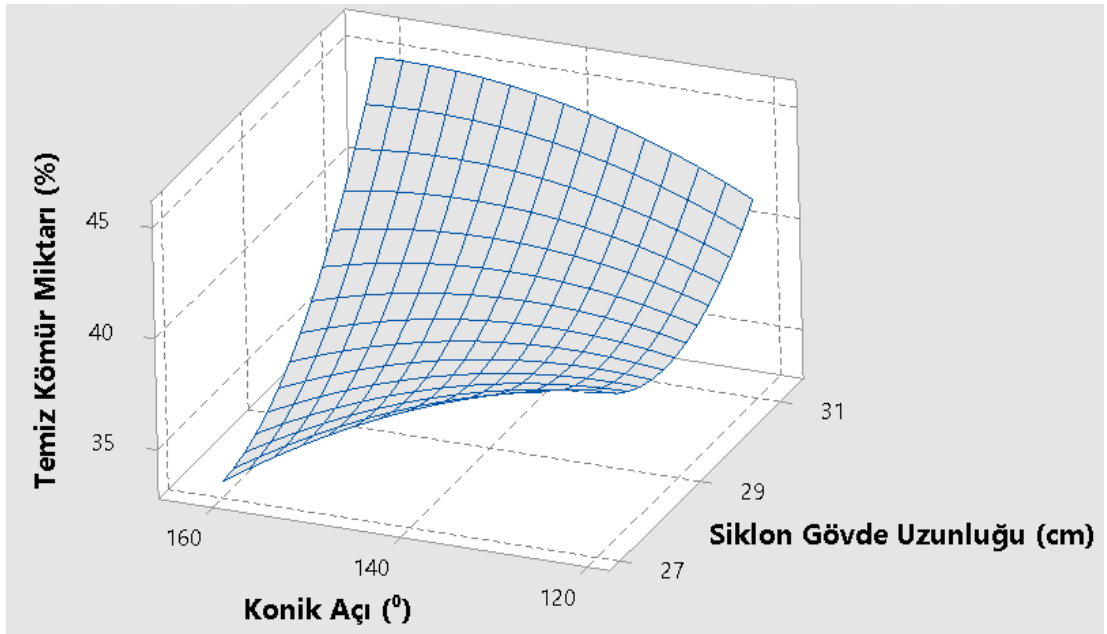


Şekil 3.37 Siklon gövde uzunluğu ve üst çıkış borusu dalma derinliğinin temiz kömür miktarına etkisi

3.2.3.2 Siklon Gövde Uzunluğu ve Konik Açının Etkisi



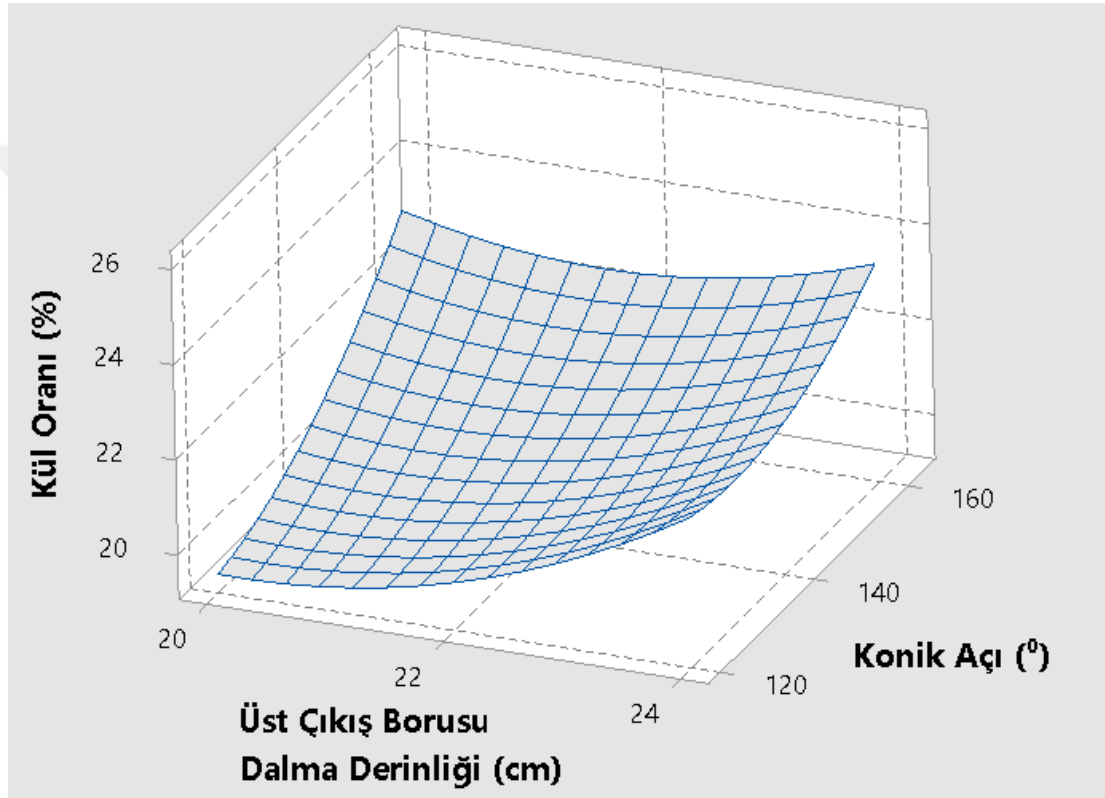
Şekil 3.38 Siklon gövde uzunluğu ve konik açının kül oranına etkisi



Şekil 3.39 Siklon gövde uzunluğu ve konik açının temiz kömür miktarına etkisi

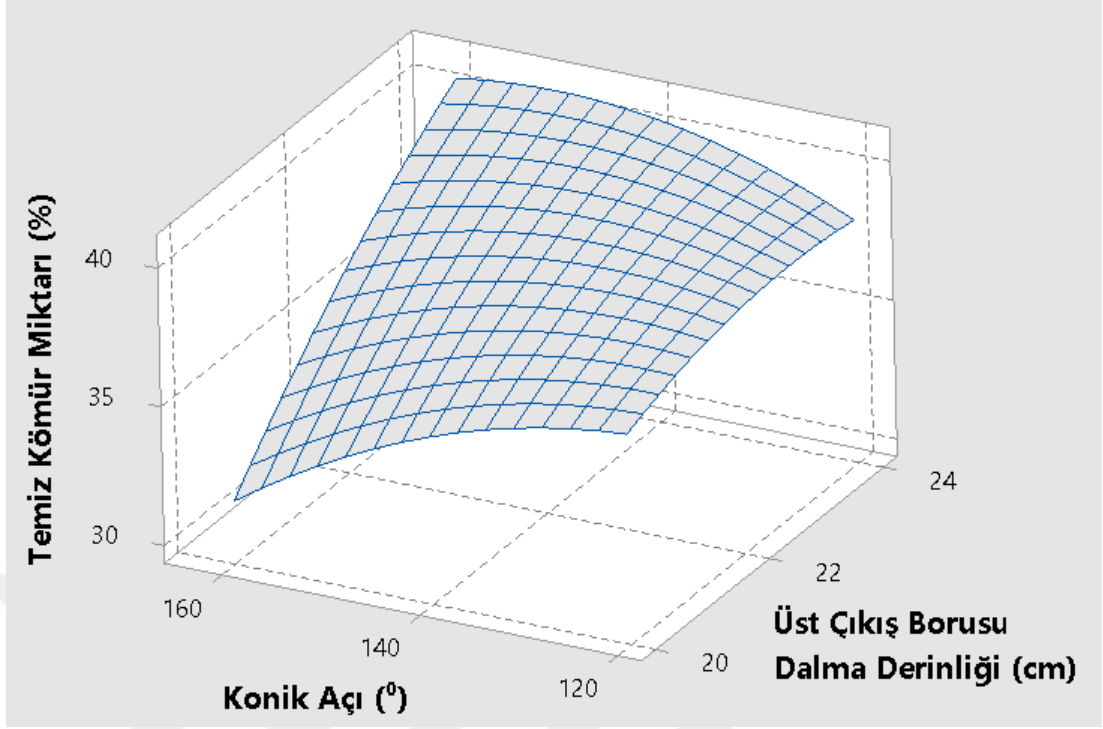
Konik açının arttıkça kül oranının arttığı görülmektedir (Şekil 3.38). Konik açı arttıkça oluşan otojen ortamın kalınlığı artmakta ve alt çıkış ile üst çıkış arasındaki mesafe azalmaktadır. Bu nedenle yoğunluğu fazla olan malzemenin bir kısmı üst çıkışa gitmekte ve kül oranını arttırmaktadır. Sonuçlar literatürle uyum göstermektedir (Majumder ve Barnwal, 2011).

3.2.3.3 Üst Çıkış Borusu Dalma Derinliği ve Konik Açının Etkisi



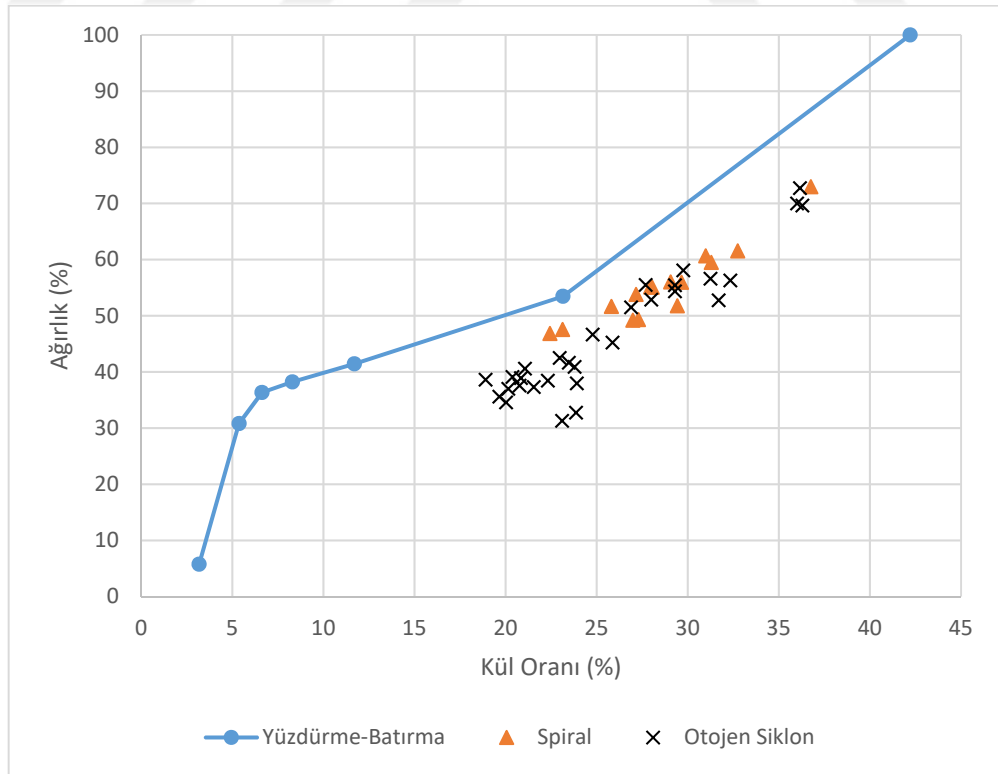
Şekil 3.40 Üst çıkış borusu dalma derinliği ve konik açının kül oranına etkisi

Üst çıkış borusu dalma derinliği arttıkça temiz kömür kül oranı ve miktarının arttığı gözlenmektedir. Dalma derinliği arttıkça siklon içerisinde oluşan otojen ortam ve üst çıkış arasındaki mesafe azalmakta ve üst çıkışa yönelen malzeme miktarı artmaktadır. Aynı zamanda otojen siklona beslenen pülp içerisindeki suyun yüksek oranda üst çıkıştan alınmasıdır. Dalma derinliğinin artmasıyla malzemenin bir kısmı da suyla beraber üst çıkışa sürüklenmekte ve kül oranının artmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.41 Üst çıkış borusu dalma derinliği ve konik açının temiz kömür miktarına etkisi

3.2.4 Soma Kömürü Spiral ve Otojen Siklonun Karşılaştırılması



Şekil 3.42 Deney sonuçlarının yüzdürme batırma testi ile karşılaştırılması

Soma bölgesine ait kömür kullanılarak yapılan çalışmada, spiral ve otojen siklon ile zenginleştirme olanakları incelenmiştir. Deney sonuçları ve yüzdürme-batırma testi karşılaştırılmıştır (Şekil 3.42). Sonuçlara bakıldığında otojen siklonun ve spiralın benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Ancak düşük kül oranlarında sadece otojen siklonla ürün alınabilmektedir.

Otojen siklon ile elde edilen en düşük temiz kömür kül oranı %18,89 ilen spiralde 22,43'tür. Aynı kül oranlarına sahip ürünler incelendiğinde, spiral ve otojen siklondan elde edilen ürünlerin organik verimi bazı noktalarda aynı olmasına rağmen genellikle spiralde daha fazladır.

3.2.5 Soma Kömürü Otojen Siklon – Spiral Devresi

Otojen siklon ve spiral sonuçları incelendiğinde, otojen siklon ürünü daha düşük kül oranına sahip olmasına rağmen genellikle kömür kazanım verimi daha düşüktür. Bu nedenle ilk aşamada otojen siklonla düşük küllü kömür alınması ve ikinci aşamada spiral kullanılarak toplam zenginleştirme veriminin artması amaçlanmıştır.

Otojen siklon tasarım ve işletme parametreleri optimize edildikten sonra %20,37 kül oranı ve ağırlıkça temiz kömür miktarı %39,11 olan bir ön konsantre elde edilmiştir. Konsantre alındıktan sonra artık spirale beslenerek tekrar zenginleştirme işlemine tabi tutulmuştur.

Spiral ile zenginleştirme aşamasında, katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığı parametreleri ile Box-Behnken deney programı hazırlanmış ve 15 deney yapılmıştır. Sonuçlara göre temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı için ampirik model oluşturulmuştur.

Tablo 3.21 Spiral için bağımsız değişkenler

Kodlanmış değerler	Bağımsız değişken	Birim	Düşük değer (-1)	Orta değer (0)	Yüksek değer (+1)
A	Katı oranı	(%)	15	20	25
B	Besleme hızı	(lt/dk)	32	40	48
C	Ayırıcı açıklığı	(cm)	3	6	9

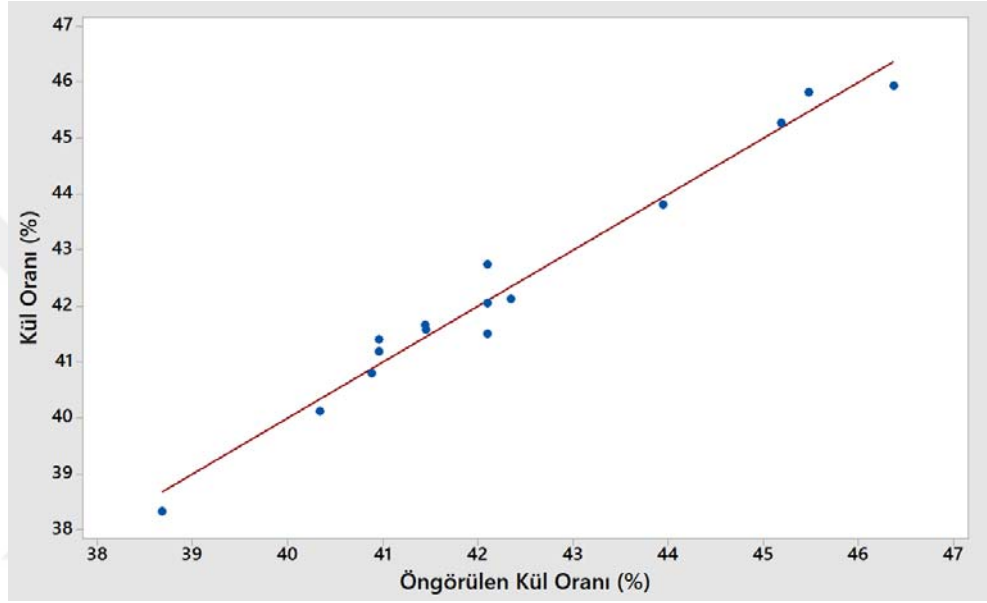
Tablo 3.22 Spiral deney sonuçları

Deney No	Katı Oranı (%) A	Besleme Hızı (L/dk) B	Ayırıcı Açıklığı (cm) C	Kül Oranı (%)	Öngörülen Kül Oranı (%)	Temiz Kömür Miktarı (%)	Öngörülen Temiz Kömür Miktarı (%)
1	15	32	6	38,33	38,68	26,73	27,25
2	20	40	6	41,51	42,10	29,78	30,27
3	15	40	9	41,18	40,96	29,93	28,45
4	15	48	6	41,66	41,45	29,52	29,69
5	20	48	3	43,82	43,95	32,33	31,36
6	20	40	6	42,74	42,10	30,91	30,27
7	25	48	6	45,82	45,47	35,07	34,55
8	20	40	6	42,06	42,10	30,11	30,27
9	20	32	3	41,40	40,96	23,58	22,27
10	20	48	9	45,93	46,37	34,24	35,55
11	15	40	3	40,80	40,89	24,09	24,88
12	25	32	6	40,12	40,34	22,60	22,43
13	25	40	3	42,13	42,35	20,99	22,47
14	25	40	9	45,28	45,19	31,69	30,90
15	20	32	9	41,58	41,45	29,10	30,07

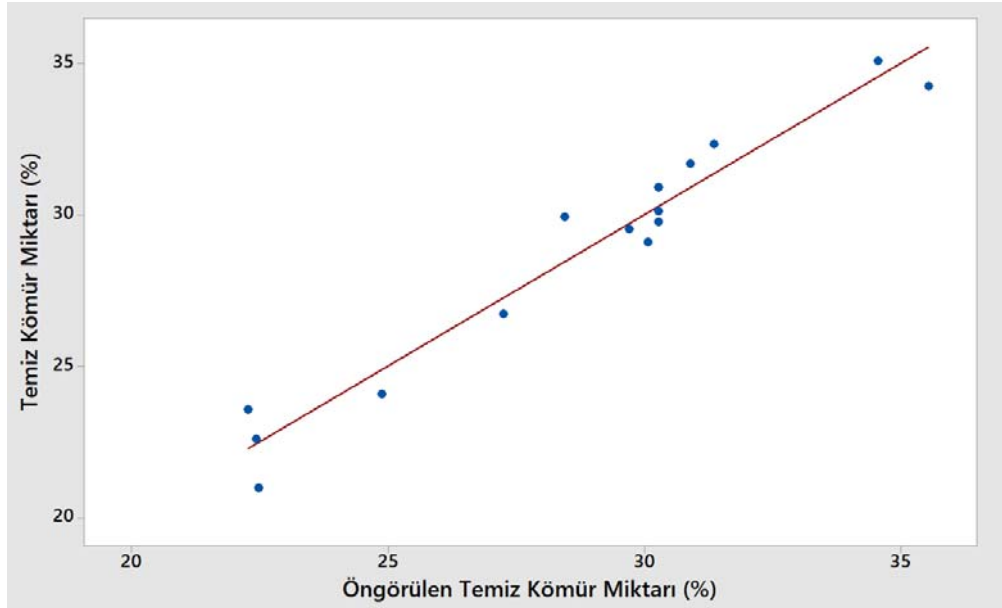
Tablo 3.22’de parametrelere bağlı deney sonuçları belirtilmiştir. Ayrıca öngörülen kül oranı ve temiz kömür miktarı da verilmektedir. Sonuçlara göre oluşturulan model eşitlikleri denklem 3.11 ve 3.12’de gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Kül Oranı (\%)} = & 42,3 + 0,581 A - 0,308 B - 2,777 C - 0,0291 A*A + 0,00173 B*B \\ & + 0,1077 C*C + 0,01479 A*B + 0,0461 A*C + 0,0201 B*C \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Temiz Kömür Miktarı (\%)} = & 28,1 + 1,04 A - 1,37 B + 2,39 C - 0,0985 A*A \\ & + 0,0106 B*B - 0,1255 C*C + 0,0605 A*B + 0,0810 A*C - 0,0376 B*C \end{aligned} \quad (3.12)$$



Şekil 3.43 Kül oranı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması



Şekil 3.44 Temiz kömür miktarı ile öngörülen değerlerin karşılaştırılması

Deney sonuçları (Tablo 3.22) ve eşitlik 3.11 ve 3.12'den oluşturulan öngörülen değerlerin karşılaştırılması, kül oranı ve temiz kömür miktarı için sırasıyla Şekil 3.39 ve 3.40'da verilmektedir. R^2 değerleri kül oranı için %97,44 ve temiz kömür miktarı için %95,14 olarak bulunmuştur. Bu R^2 değerleri oluşturulan model ve deneysel sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.23 Spiral temiz kömür kül oranı ANOVA değerleri

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Değeri	F- Değeri	Prob>F
Model	9	61,795	6,866	21,150	0,020
A	1	16,177	16,177	49,830	0,001
B	1	31,229	31,229	96,200	0,000
C	1	4,249	4,249	13,090	0,015
A*A	1	1,956	1,956	6,030	0,058
B*B	1	0,045	0,045	0,140	0,724
C*C	1	3,472	3,472	10,690	0,022
A*B	1	1,400	1,400	4,310	0,092
A*C	1	1,913	1,913	5,890	0,060
B*C	1	0,933	0,933	2,870	0,151
Lack-of-fit	3	0,861	0,287	0,750	0,614
Pure error	2	0,762	0,381		

Temiz kömür kül oranı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin Prob>F değerinin 0,05'den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,614 olarak bulunmuştur. Bu değer 0,05'den büyük olduğu için anlamsızdır ve oluşturulan modelin uygun olduğunu göstermektedir. Model ana parametreleri (A,B,C) Prob>F 0,05'den küçük olduğu için anlamlıdır. Model için en önemli parametreyi F değeri belirlemektedir. F değerinin yüksek olması parametrenin model üzerindeki etkisinin

daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. F değeri incelendiğinde $B > A > C$ olduğu görülmektedir.

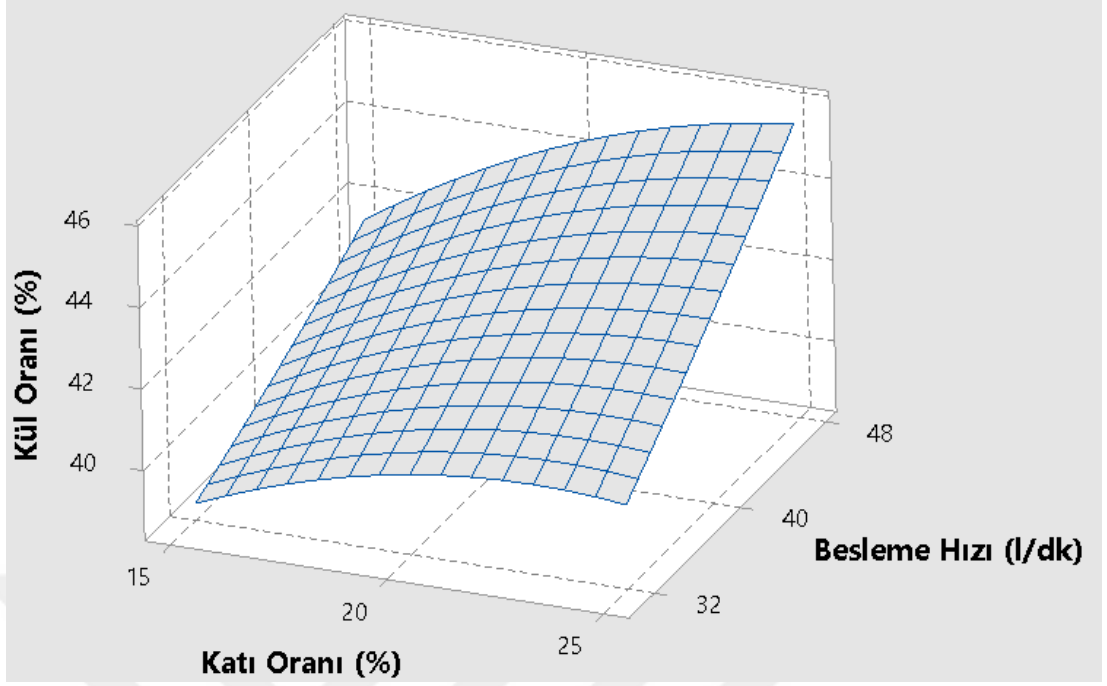
Temiz kömür miktarı için oluşturulan modellerin anlamlılık testi için varyans analizi yapılmıştır. Modelin F değerinin yüksek ve Prob>F değerinin 0,05’den küçük olması sebebiyle anlamlıdır. Model uygunsuzluğu (lack-of-fit) testi Prob>F değeri 0,05’den büyük olduğu için modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Ana parametrelerin model üzerindeki etkisi incelendiğinde, katı oranı Prob>F değeri 0,05’den büyük olduğu görülmektedir. Bu nedenle model için anlamsızdır.

Tablo 3.24 Spiral temiz kömür miktarı ANOVA değerleri

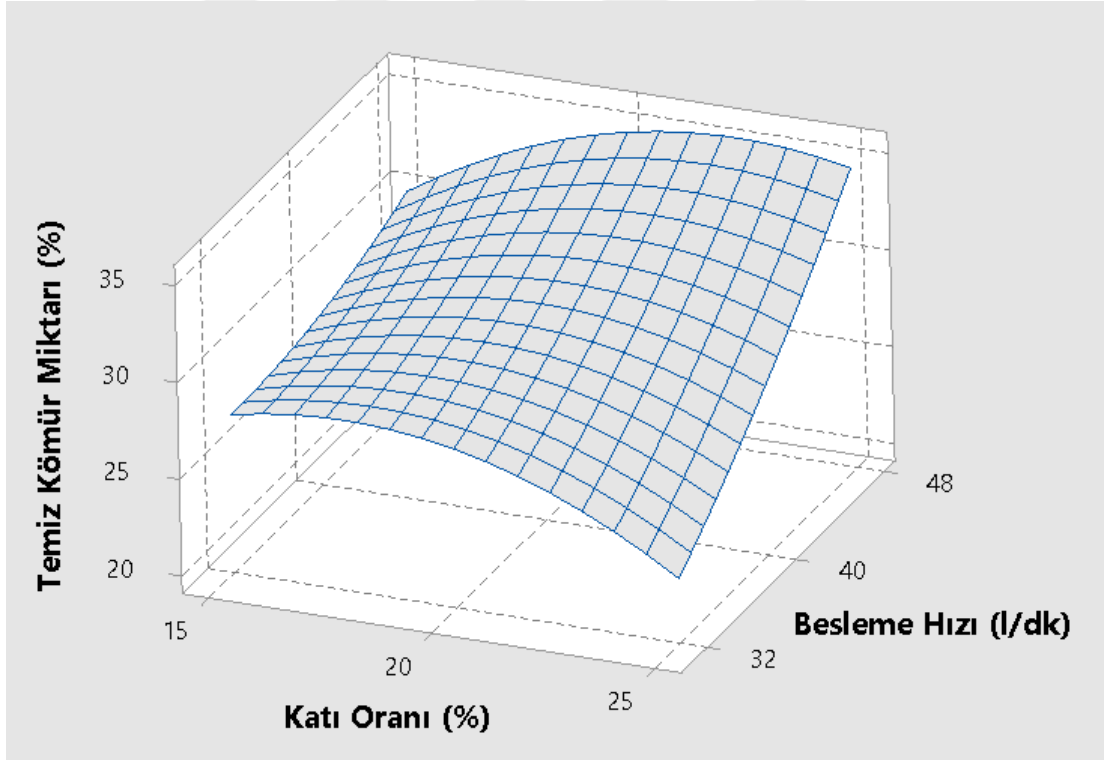
	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama kareler Değeri	F-Değeri	Prob>F
Model	9	239,533	26,615	10,880	0,009
A	1	0,001	0,001	0,000	0,986
B	1	106,245	106,245	43,400	0,001
C	1	71,820	71,820	29,350	0,003
A*A	1	22,382	22,382	9,150	0,029
B*B	1	1,684	1,684	0,690	0,445
C*C	1	4,711	4,711	1,930	0,224
A*B	1	23,426	23,426	9,570	0,027
A*C	1	5,905	5,905	2,410	0,181
B*C	1	3,258	3,258	1,330	0,301
Lack-of-fit	3	11,561	3,854	11,410	0,082
Pure error	2	0,675	0,338		

3.2.5.1 Katı oranı ve Besleme Hızının Etkisi

Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi Şekil 3.45’de ve temiz kömür miktarına etkisi Şekil 3.46’da gösterilmektedir.



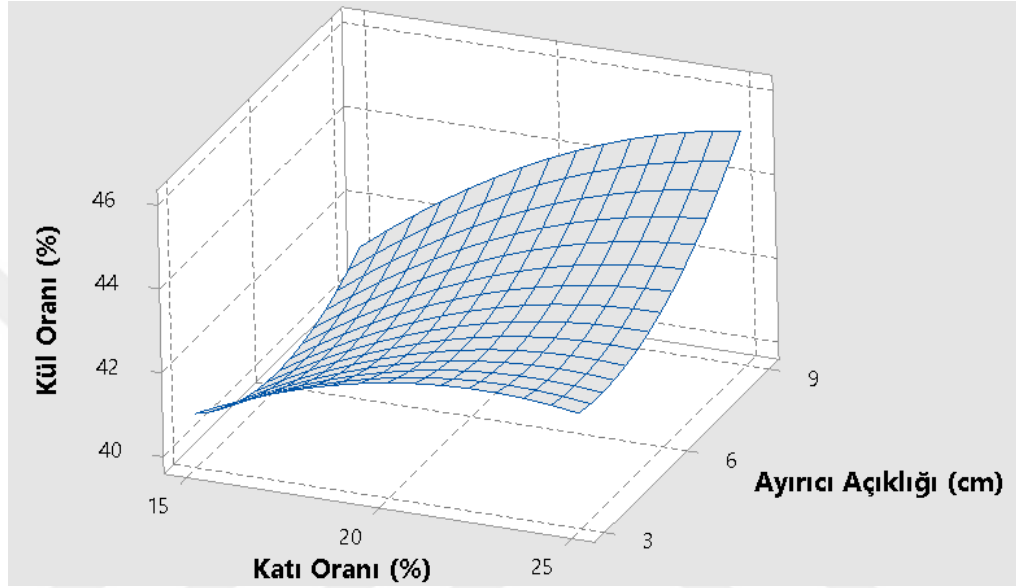
Şekil 3.45 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür kül oranına etkisi



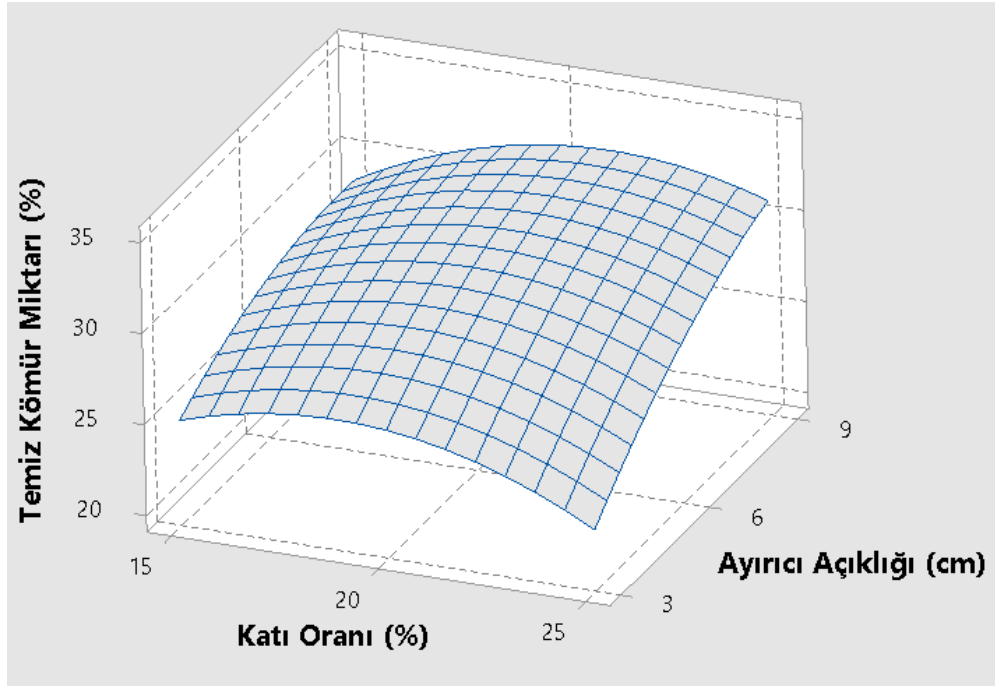
Şekil 3.46 Katı oranı ve besleme hızının temiz kömür miktarına etkisi

Katı oranı arttıkça kül oranı bir miktar düşmektedir. Katı oranının temiz kömür miktarına etkisi incelendiğinde ise, bu parametrenin oluşturulan model üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir.

3.2.5.2 Katı oranı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi



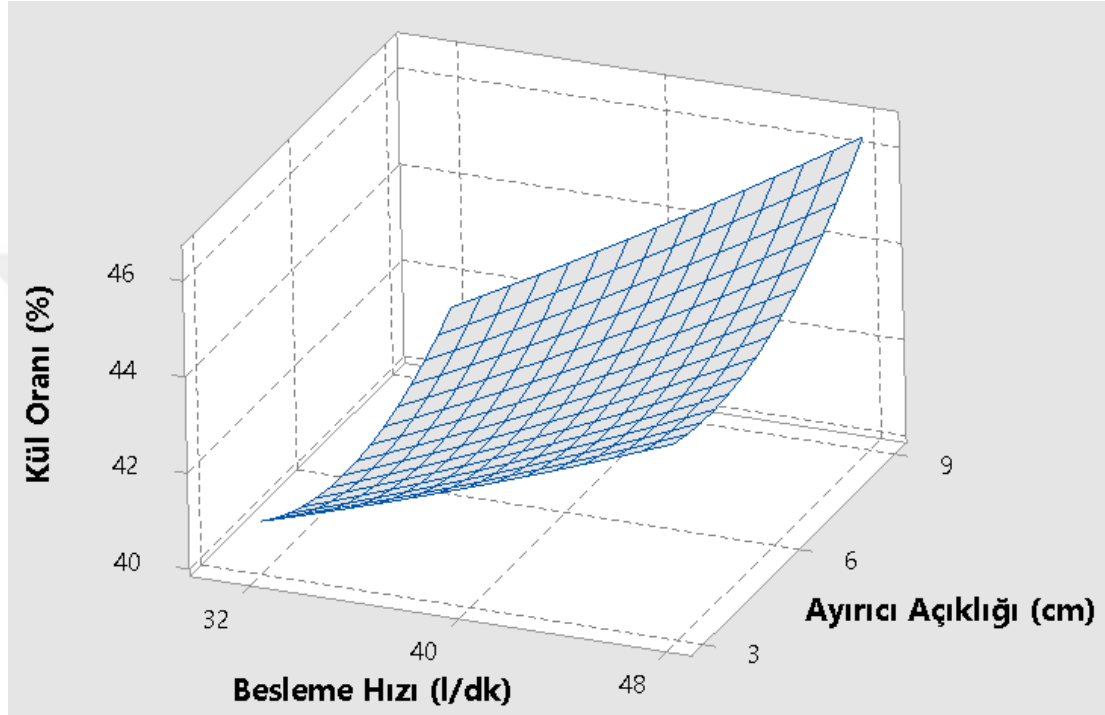
Şekil 3.47 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi



Şekil 3.48 Katı oranı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

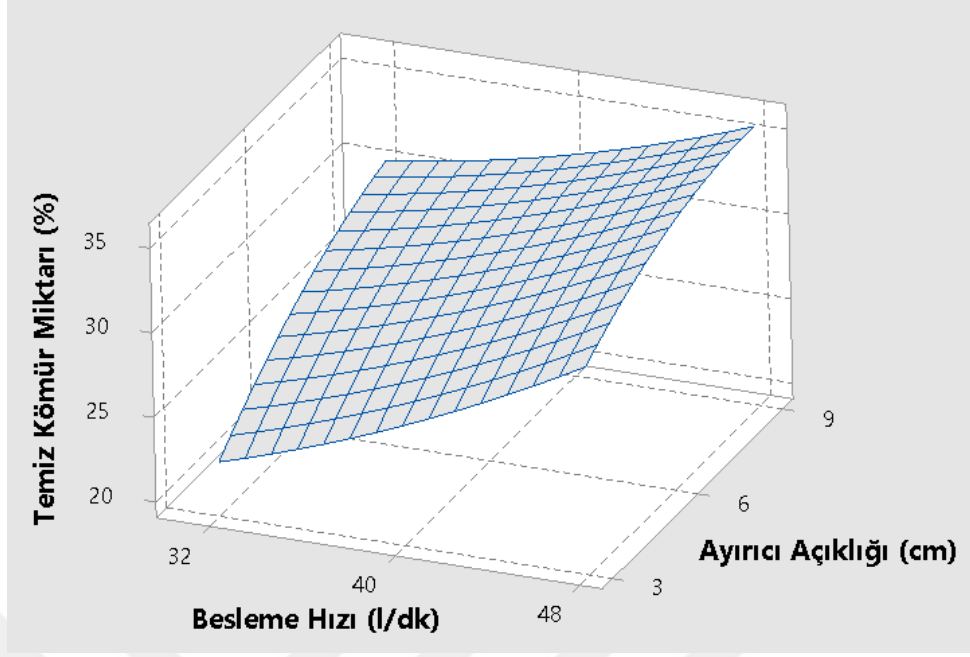
Ayırıcı açıklığı arttıkça kül oranının arttığı görülmektedir. Spiral yüzeyinde malzeme merkezde yoğunluğu fazla ve kenarlarda hafif taneler olacak şekilde hareket etmektedir.

3.2.5.3 Besleme Hızı ve Ayırıcı Açıklığının Etkisi



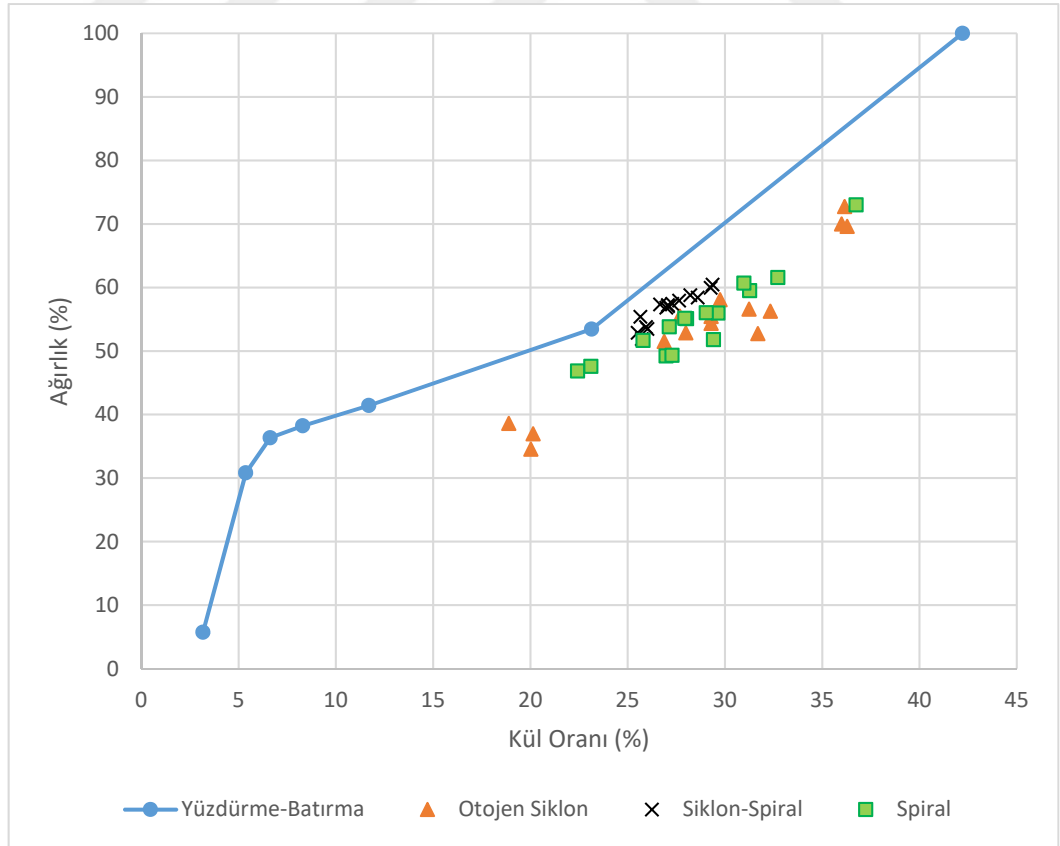
Şekil 3.49 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür kül oranına etkisi

Besleme hızı arttıkça temiz kömür kül oranı ve temiz kömür miktarı artmaktadır. Besleme hızının artmasıyla spiral yüzeyindeki pülp hızı artmakta ve ağır tanelerin bir kısmını da hafif tanelerle birlikte spiral çeperine doğru sürüklemektedir. Bu nedenle daha fazla malzeme temiz kömür çıkışına gitmekte ve ağırlıkça temiz kömür miktarını arttırmaktadır. Aynı zamanda temiz kömür çıkışına giden ağır taneler nihai ürün kül oranını arttırmaktadır.



Şekil 3.50 Besleme hızı ve ayırıcı açıklığının temiz kömür miktarına etkisi

3.2.6 Soma Kömürü Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 3.51 Soma kömürü deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Soma kömürü ile yapılan bütün sonuçlar incelendiğinde, en düşük kül oranlarına sadece otojen siklon kullanıldığında ulaşıldığı görülmektedir. Buna rağmen kömür kazanım oranı yeterince iyi değildir. otojen siklon-spiral devresinde ise kül oranları %25-30 arasında ve kömür kazanım oranı oldukça yüksektir. Bu durumda kül oranı daha düşük ürün istendiğinde, spiral konsantresi ara ürün olarak ayrı şekilde alınabilir ve farklı alanlarda değerlendirilebilir.



BÖLÜM DÖRT

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Tez çalışmasında, Aydın ve Soma bölgesinden alınan linyitlerin otojen siklon ve spiral ile zenginleştirme olanakları araştırılmıştır. Box-Behnken deney tasarımı ve yüzey yanıt yöntemiyle modeller oluşturulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

- Aydın ve Soma bölgesine ait linyitler yüzdürme-batırma testine tabi tutulmuştur. Buna göre Aydın kömürü yıkanabilirliği zor iken, Soma kömürünün kolay yıkanabilir bir kömür olduğu gözlemlenmiştir.
- Aydın bölgesine ait linyitlerde spiral kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığının, temiz kömür kül oranı ve miktarına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde parametrelerin model üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu görülmektedir. Katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığı arttıkça kül oranı ve temiz kömür miktarı artmıştır. Elde edilen sonuçlarda kül oranı %27,38-%32,73 arasında değişirken, temiz kömür miktarı %64,12-%82,64 arasındadır.
- Aydın bölgesi linyitlerinin otojen siklonda zenginleştirme olanakları incelenmiştir. Deneylerde katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapının etkileri araştırılmıştır. Oluşturulan modele bakıldığında katı oranı arttıkça temiz kömür kül oranı arttığı görülürken, temiz kömür miktarının etkisiz olduğu görülmüştür. Diğer parametrelerde ise, besleme hızı ve üst çıkış çapı arttıkça temiz kömür miktarı ve kül oranı artmıştır. Temiz kömür kül oranı %24,21 ile %29,58 arasındayken, temiz kömür miktarı %56,27- %60,84 aralığındadır. Yapılan testlerde spirale göre, otojen siklon ile daha düşük kül oranlarına ulaşılmasına rağmen, temiz kömür miktarı da düşmüştür.
- Soma bölgesine ait linyitlerde spiral kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığının, temiz kömür kül oranı

ve miktarına etkisi incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde parametrelerin model üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu görülmektedir. Katı oranı, besleme hızı ve ayırıcı açıklığı arttıkça kül oranı ve temiz kömür miktarı artmıştır. Elde edilen sonuçlarda kül oranı %22,43-%32,73 arasında değişirken, temiz kömür miktarı %46,57-%73,29 arasındadır.

- Soma bölgesi linyitlerinin otojen siklonda zenginleştirme olanakları incelenmiştir. Deneylerin ilk aşamasında katı oranı, besleme basıncı ve üst çıkış çapının etkileri araştırılmıştır. Sonrasında, ilke aşamada elde edilen optimum parametrelerde, üst çıkış borusu dalma derinliği, konik açısı ve siklon gövde uzunluğunun etkisi araştırılmıştır. Temiz kömür kül oranı %18,89 ile %36,28 arasındayken, temiz kömür miktarı %31,28- %72,74 aralığındadır. Yapılan testlerde spirale göre, otojen siklon ile daha düşük kül oranlarına ulaşılmasına rağmen, temiz kömür miktarı da düşmüştür.
- Otojen siklonların endüstriyel uygulaması genellikle, kömür ile yantaş arasında yüksek yoğunluk olan taş kömürleridir. Aydın kömürü ile yapılan çalışmalarda, Aydın kömürünün zor yıkanabilir olmasından kaynaklı otojen siklon çalışma verimi oldukça düşüktür. Elde edilen ürünler yüzdürme-batırma sonuçları ile kıyaslandığında organik verimin %70 civarında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte kül oranı %34,84'den %24,21'e düşmüştür. Bu nedenle bu tür bir kömürde otojen siklonun kullanımının verimli olmayacağı öngörülmektedir.
- Soma kömüründe otojen siklon kullanımı incelendiğinde ise, kül oranının %42,21 'den %18,89'a kadar düşürüldüğü ve organik verimin %80 ve üstünde olduğu görülmektedir. Otojen siklonun yapısında kaynaklı daha iri kömür taneleri alt çıkışa gitmekte ve kömür kazanım miktarını düşürmektedir. Bu nedenle alt çıkıştan alınan malzeme başka bir cihazla zenginleştirilerek yıkama tesisi toplam veriminin artırılması amaçlanmıştır.
- Otojen siklon ve spiralin birlikte çalışması durumunu incelemek için Soma kömürü ile deneyler yapılmıştır. Otojen siklon tasarım ve işletme parametreleri

optimize edildikten sonra %20,37 kül oranı ve ağırlıkça temiz kömür miktarı %39,11 olan bir ön konsantre elde edilmiştir. Konsantre alındıktan sonra artık spirale beslenerek tekrar zenginleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Spiral ile zenginleştirme aşamasında deney tasarımı ile 15 deney yapılmış ve nihai sonuca ulaşılmıştır.

- Soma kömürü sonuçları incelendiğinde otojen siklon-spiral devresi kömür kazanım oranının oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Spiral konsantresi ile otojen siklon konsantresi birleştirildiğinde kül oranı %25-30 arasında bulunmuştur. Daha düşük kül oranları istendiğinde konsantreler birleştirilmeden alınabilir ve spiral konsantresi farklı bir alanda değerlendirilebilir. Kül oranı ve temiz kömür miktarına bakıldığında, otojen siklon-spiral kombinasyonunun kolay yıkanabilir bir linyit kömüründe, optimize edildikten sonra kullanılabileceğini göstermektedir.
- Ülkemizde bulunan kömür yıkama tesislerinde, -0,5 mm kömürler spiral ile zenginleştirilmekte veya susuzlandırılarak kullanılmaktadır. 20-0,5 mm ise ağır ortam siklonları ile zenginleştirilmektedir. Bu çalışmada üst boyut 1 mm olarak alınarak ince boyutta zenginleştirme yapan ağır ortam siklonlarının verimliliğinin artırılması da çalışmanın amaçları arasındadır. -1 mm tane boyutunda otojen siklon, spiral ve ikisinin kombinasyonu incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre otojen siklon-spiral kombinasyonun sadece spirale göre aynı kül oranlarında, temiz kömür miktarı açısından avantajlı olduğu görülmektedir. Bu da mevcut durumda çalışan kömür yıkama tesislerinde bu sistemin kullanılarak kömür kazanma veriminin artırılabilceğini göstermektedir.
- Kömür yıkama tesisinde spiralden önce bulunan sınıflandırma siklonu yerine otojen siklon kullanılarak toplam kömür kazanma verimi artırılabilir. Otojen siklon ile sınıflandırma siklonu arasında tertibat gereksinimi açısından fark olmaması nedeniyle tesislere kolaylıkla uyarlanabilir. Bu nedenle kolay yıkanabilir kömür tesislerinde parametrelerin optimize edilerek otojen siklon-spiral devresinin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbas N. ve Muhammad K. (2016). Optimization of Operating and Design Parameters of Water only Cyclone using Cherat Coal in Pakistan. *Journal of Nuclear Energy Science & Power Generation Technology*, 5(2).
- Bethell P. ve Luttrell G. (2004). Coal preparation. *Encyclopedia of Energy: Volume 1*, 507–528. New York: Elsevier.
- Bethell P. ve Moorhead R.G. (2003). Operating Characteristics of Water-only Cyclone/Spiral Circuits Cleaning Fine Coal. R.Q.Honaker ve W.R.Forrest (Ed.), *Advances in Gravity Separations* (93-106). Amerika: SME.
- Bhatt M. S. (2006). Effect of Ash in Coal on the Performance of Coal Fired Thermal Power Plants. Part II: Capacity and Secondary Energy Effects. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(1), 43-58
- BP, (2022) *Statistical Review of World Energy*. 20 Ağustos 2022. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Çiçek T. , Cöcen İ. , Engin V. T. ve Cengizler H. (2008). An Efficient Process for Recovery of Fine Coal from Tailings of Coal Washing Plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 30(18), 1716-1728.
- Das, S.K., Godiwalla, K.M., Panda, L., Bhattacharya, K.K., Singh, R. ve Mehrotra, S.P. (2007). Mathematical modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral. *International Journal of Mineral Processing*, 84(1-4), 118-132.
- Galvin K. P. ve. Iveson M. (2013) Cleaning of coarse and small coal. *The coal handbook Towards cleaner production Volume 1: Coal production* (263-300). Cambridge, Birleşik Krallık: Woodhead Publishing Limited.

- Hacıfazlıoğlu H. (2012a). Application Of The Modified Water-Only Cyclone For Cleaning Fine Coals in A Turkish Washery, And Comparison Of Its Performance Results With Those Of Spiral And Flotation. *Fuel Processing Technology*, 102, 11-17.
- Hacıfazlıoğlu H. (2012). Optimization of Some Parameters in a Modified Water-Only Cyclone for Metallurgical Coal Production from High-Ash Fine Coking Coals. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 32(6), 290-297.
- Hembrom A.A. ve Suresh N. (2018). Evaluation of the performance of water-only cyclone for fine coal beneficiation using optimization process. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(23), 2842-2852.
- Honaker, R.Q., Kohmuench, J. ve Luttrell, G.H., (2013). Cleaning of Fine and Ultrafine Coal, D. Osborne, (Ed.), *The Coal Handbook Volume 1: Coal Production* (301-346). Woodhead Publishing Limited.
- Honaker, R. Q. ve Mondal, K., (1999). Dynamic Modelling of Fine Particle Separations in a Hindered Bed Classifier, *Coal Preparation* 21(2). 211-232.
- Honaker R. Q. , Singh N. ve Govindarajan B. (2000). Application of Dense-Medium In An Enhanced Gravity Separator For Fine Coal Cleaning. *Minerals Engineering*, 13(4), 415-427.
- Kalyani V.K., Charan T.G., Haldar D.D., Sinha A. ve Suresh N. (2008). Coal-Fine Beneficiation Studies of a Bench-Scale Water-Only Cyclone Using Artificial Neural Network. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28.(2), 94-114.
- Kemal, M. ve Arslan, V. (1999). *Kömür teknolojisi*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.

- Kohmuench J.N, Mankosa M.J., ve Honaker R.Q. (2003). Advances in Teeter-bed Technology for Coal Cleaning Applications. R.Q.Honaker ve W.R.Forrest (Ed.), *Advances in Gravity Separations* (93-106). Amerika: SME.
- Kohmuench, J.N., Mankosa, M.J., Luttrell, G.H. ve Adel G.T., (2002). Process engineering evaluation of the CrossFlow Separator. *Mining, Metallurgy & Exploration* 19, 43–49.
- Korkmaz, A. A. (2021). Modeling of the effect of falcon concentrator parameters on lignite deashing with Taguchi orthogonal design. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 41(11), 767-775.
- Luttrell G.H. (2003) Density Separations: Are We Really Making Use of Existing Process Engineering Knowledge?, R.Q.Honaker ve W.R.Forrest (Ed.), *Advances in Gravity Separations* (1-15). Amerika: SME.
- Luttrell G.H., Ali Z., Dynys A., Watters L., ve Moorhead R. (2012). Design and Operating Guidelines for Combined Water-Only Cyclone and Spiral Circuits. *Challenges in Fine Coal Processing, Dewatering and Disposal*, (241-258). Amerika: SME.
- Luttrell G.H., Honaker R.Q., Bethell P.J., ve Stanley F.L. (2007). Design of High-Efficiency Spiral Circuits for Preparation Plants. Barbara J. Arnold, Mark S. Klima, Peter J. Bethell (Ed.), *Designing the Coal Preparation Plant of the Future* (73-87). Amerika: SME.
- Ma, G., Bu, X., Xie, G., Peng, Y., Sha, J., Xia, W. ve Wu, E. (2021). Comparative Study of Separation Performance of a Spiral and Dense- medium Cyclone on *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 41, 108–116.

- Maharana B.S., ve Suresh N. (2021). Taguchi based Grey relational analysis for optimization of design parameters of a 100 mm water-only cyclone. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 41(8), 539-553.
- Majumder A.K ve Barnwal J.P. (2011). Processing Of Coal Fines In A Water-Only Cyclone. *Fuel* 90, 834–837.
- Meyers, R.H., Montgomery, D.C., ve Anderson-Cook C. M. (2016). *Response surface methodology; Process and product optimization using designed experiments*. (4. Baskı). New Jersey, Amerika: John Wiley & Sons, Inc.
- Önel, Ö. (2020). *Taşkömürlerinden çok düşük küllü temiz kömür üretimi ve kömür artıklarından nadir toprak elementlerinin kazanımının araştırılması*. [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Öney Ö. ve Samanlı S. (2017). Kütahya/Altıntaş Grafitlerinin Kaba Flotasyon Parametrelerinin Box-Behnken Deney Tasarımı Kullanılarak Optimizasyonu ve Modellenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19 (56).
- Özcan, Ö. (2017). Kabaran Yataklı Ayırıcı ile Farklı Minerallerin Zenginleştirilmesi. *Yerbilimleri*, 38 (2) , 179-192.
- Özgen S., Arsoy Z., Ersoy B. ve Çiftçi H. (2021). Coal recovery from coal washing plant tailings with Knelson concentrator. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 42(3), 820-830.
- Özgen S., Malkoç Ö., Doğancık C., Sabah E. ve Şapçı F.O. (2011). Optimization of a Multi Gravity Separator to produce clean coal from Turkish lignite fine coal tailings. *Fuel*, 90, 1549-1555.

Patil, D.P, Bhaskar, K.U Jakhu, M.R ve Rao T.C (1997) Removal of graphite from lead rougher concentrate using water-only cyclones. *International Journal of Mineral Processing* 49 (1-2),87-96.

Rao S.D.V. ve Gouricharan T. (2016). *Coal Processing and Utilization*. Londra: CRC Press/Balkema.

Sabah E. ve Koltka S. (2014). Separation Development Studies on the Beneficiation of Fine Lignite Coal Tailings by the Knelson Concentrator. *Energy Fuel*, 28, 4819-4827.

SGMET (2022). *Falcon C-Gravity Concentrators*. 20 Ağustos 2022. <https://www.sgmet.com/product/falcongravityconcentrators/>

Shekhar, S., Singh, R.K. ve Chalavadi G. (2018). Study of process efficiency for high-ash fine coal cleaning in a Kelsey centrifugal jig. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 38(5), 250-259.

Speight, J. G. (2012). *The chemistry and technology of coal*. Amerika: CRC press.

Sun M., Wei L. ve Cui G. (2016). Studies of a Water-Only Cyclone with a Three-Stage Cone for Fine Coal Beneficiation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 37(2), 75-86.

TKİ, (2021). *Faaliyet Raporu*. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu, 48.

TKİ, (2022). *Enerji ve Kömür*. 20 Ağustos 2022, <https://www.tki.gov.tr/enerji-ve-komur>.

Underground coal (2022) *.Rank of coal seam*. 20 Ağustos 2022. <http://www.undergroundcoal.com.au/outburst/rank.aspx>

- Wang, C., L.B. Wei, and G.W. Cui. 2020. Effects of the operating parameters on the separation results of a three-stage cone water-only cyclone. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(8), 2314-2331.
- Wen, B. F., Xia, W. C. ve Sokolovic, J. M.. (2017). Recent advances in effective collectors for enhancing the flotation of low rank/oxidized coals. *Powder Technology* 319,1–11.
- Yaşar, Ö. (2018). *Tunçbilek lavvarı ince atıklarından yağ aglomerasyonu yöntemiyle kömür kazanımı*. [Doktora Tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Ye G., Huo Y., Li C., Deng C., Yu Y., Huang G. ve Ma L. (2021). A comparative study of trough profile and operating parameters performance in spiral concentrator. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 41(9), 678-691.
- Yerriswany, P.,Majumder, A:K., Barnwall, J. P., Govindarajan, B., ve Rao,T.C. (2003). Study on Kelsey Jig treating Indian coal fines. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall)*. 112(3) ,208-210.