

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FALCON SANTRİFÜJLÜ GRAVİTE AYIRICISINDA  
ZENGİNLEŞTİRMENİN MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ  
Ozan KÖKKILIÇ**

**Anabilim Dalı : Maden Mühendisliği**

**Programı : Maden Mühendisliği**

**KASIM 2011**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FALCON SANTRİFÜJLÜ GRAVİTE AYIRICISINDA  
ZENGİNLEŞTİRMENİN MODELLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ  
Ozan KÖKKILIÇ  
(505032102)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Ekim 2011  
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Kasım 2011**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Neşet ACARKAN (İTÜ)  
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ayhan A. SİRKECİ (İTÜ)  
Prof. Dr. Levent ERGÜN (HÜ)  
Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK (İTÜ)  
Prof. Dr. Şafak G. ÖZKAN (İÜ)**

**KASIM 2011**



*Ananeme*



## ÖNSÖZ

Gerek tez çalışmalarında gerekse öğrencilik ve akademik hayatımda bana yardımcı olan ve her türlü imkanı sağlayan, bilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Neşet ACARKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde önemli katkısı ve desteği olan bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren Yard. Doç. Dr. Feridun BOYLU'ya, tez izleme komitemde yer alarak çalışmalarım süresince yapıcı eleştirileri ve destekleri için Prof. Dr. Ayhan A. SİRKECİ'ye ve Prof. Dr. Levent ERGÜN'e, her sorduğum soruyu sabırla yanıtlayan Sayın Prof. Dr. Gündüz ATEŞOK ve Sayın Doç. Dr. A. Ekrem Yüce'ye, tez çalışmam boyunca teknik imkanlarından yararlandığım Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Fatma ARSLAN'a ve bölümde görev yapan saygıdeğer bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince, değerli yardımları için Araş. Gör. Hüseyin BAŞTÜRKCÜ ve Araş. Gör. Onur GÜVEN'e, tüm bu zaman içerisinde yardımlarını, zamanlarını ve sohbetlerini esirgemeyen, bana bilgi ve tecrübeleriyle destek olan Yard. Doç. Dr. Olgaç KANGAL, Araş. Gör. Dr. K. Tahsin PEREK, Yük. Müh. Mustafa ÖZER, Araş. Gör. Dr. Fırat BURAT, Araş. Gör. Dr. Fırat KARAKAŞ, Ömer KURULU ve Adnan UYSAL'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, kimyasal analizlerin yapılmasında yardımlarını gördüğüm Sayın Kim. Müh. Sezin BAKAN'a teşekkür ederim.

Bu yoğun dönemde bana her türlü desteği ve sabrı gösteren, sevgili dostlarım Yıldız, Emrah ASILYAZICI ve Gökçe, Kadir MOLLA çiftlerine ve sevgili kardeşim, Esra ve eşi Onur BAL'a;

Doğduğum günden itibaren her şeylerini benim için feda etmekten kaçınmayan ve uzun süre öğrenci olarak sürdürdüğüm hayatıma müsamaha göstermekle kalmayıp, her türlü desteği sunan sevgili anneme, babama ve bugünleri görmesini en çok istediğim biricik ananeme;

Ve her şeyden ve herkesten önce ANANEM'e;

SONSUZ TEŞEKKÜR EDERİM.

Ekim 2011

Ozan KÖKKILIÇ





# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖNSÖZ</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>KISALTMALAR</b> .....	ix
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xi
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xv
<b>ÖZET</b> .....	xix
<b>SUMMARY</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	5
2.1 Oransal Santrifüj Kuvveti (G).....	11
2.1.1 Tanelerin santrifüj alan içerisindeki davranışları .....	13
2.1.2 Santrifüj ile çökmenin matematiksel tanımı .....	15
2.2 Geliştirilmiş Gravite Ayırıcıları .....	17
2.2.1 Mozley multi gravite ayırıcısı (MGS) .....	20
2.2.2 Kelsey jigi .....	23
2.2.3 Knelson ayırıcısı.....	26
2.2.4 Falcon ayırıcıları.....	30
2.2.4.1 Falcon SuperBowl (SB) ayırıcısı.....	30
2.2.4.2 Falcon C .....	36
2.3 İstatistiksel Deney Tasarım Yöntemleri .....	41
2.3.1 Yanıt yüzeyi yöntemleri (YYY).....	46
2.3.1.1 Merkezi kompozit tasarımı (MKT) .....	51
2.4 Santrifüjlü Gravite Ayırıcılarıyla Yapılan Çalışmalar .....	53
<b>3. MALZEME ve YÖNTEM</b> .....	67
3.1 Deneysel Çalışmalara Esas Olan Numuneler ve Özellikleri.....	67
3.1.1 Kil numunesi .....	67
3.1.2 Kömür numuneleri.....	68
3.2 Yöntem .....	70
3.2.1 Merkezi kompozit tasarımı (MKT) ile deney tasarımı .....	71
3.2.1.1 Kil zenginleştirme deney tasarımı .....	71
3.2.1.2 Kömür zenginleştirme deney tasarımı .....	72
3.2.2 Yüzey yanıt yöntemi analizi .....	76
3.2.2.1 Varyans analizi (ANOVA).....	76
3.2.2.2 Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri .....	77
3.2.2.3 Model uygunluk testleri .....	78
3.2.2.4 Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile deneylerin analizi .....	80
3.2.3 Optimizasyon .....	82
3.2.3.1 Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile optimizasyon .....	82
3.2.3.2 Kritik noktanın hesaplanması ile optimizasyon .....	82
3.2.3.3 Örtüşen kontur grafiği yardımı ile optimizasyon .....	83

3.2.3.4 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile modelleme.....	84
3.2.4 Ayırma boyutuna göre değerlendirme.....	85
3.3 Techizat .....	86
3.3.1 Kil deneylerinde kullanılan analiz yöntemleri ve cihazları.....	86
3.3.2 Kömür deneylerinde kullanılan analiz yöntemleri ve cihazları.....	88
3.3.3 Falcon ayırıcısı.....	91
<b>4. ZENGİNLEŞTİRME DENEYLERİ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI..</b>	<b>93</b>
4.1 Kil Zenginleştirme Deneyleri ve Modellemesi.....	93
4.1.1 Varyans analizi (ANOVA) .....	97
4.1.2 Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri .....	97
4.1.3 Model uygunluk testleri.....	99
4.1.3.1 Normalite varsayımı .....	100
4.1.3.2 Kalıntıların model değerlerine göre karşılaştırmalı diyagramı .....	100
4.1.3.3 Zaman sıralamasında kalıntıların işaretlenmesi .....	101
4.1.4 Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri .....	102
4.1.4.1 G ve PKO'nun zenginleştirmeye etkisi .....	103
4.1.4.2 G ve besleme hızının zenginleştirmeye etkisi.....	105
4.1.4.3 G ve besleme miktarının zenginleştirmeye etkisi .....	106
4.1.4.4 PKO ve besleme hızının zenginleştirmeye etkisi.....	108
4.1.4.5 PKO ve besleme miktarının zenginleştirmeye etkisi .....	109
4.1.4.6 G, PKO, besleme hızı ve miktarının zenginleştirmeye etkisi .....	110
4.1.5 Zenginleştirmenin optimizasyonu.....	116
4.1.5.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon.....	116
4.1.5.2 Kritik noktanın hesaplanması ile optimizasyon .....	117
4.1.5.3 Örtüşen kontur grafiği yardımı ile optimizasyon .....	117
4.1.5.4 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon .....	118
4.1.6 Zenginleştirmenin ayırma boyutu yönünden irdelenmesi .....	120
4.2 Kömür Zenginleştirme Deneyleri ve Modellemeleri .....	124
4.2.1 Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi ve modellemesi .....	124
4.2.1.1 Isıl değer için model denklemi.....	124
4.2.1.2 Yanabilir verim için model denklemi.....	134
4.2.1.3 Temiz kömür verimi için model denklemi .....	143
4.2.1.4 Kül uzaklaştırma oranı için model denklemi .....	153
4.2.1.5 Ayırma etkinliği yönünden inceleme .....	162
4.2.2 Yüksek kül içeren kömür zenginleştirmenin optimizasyonu .....	164
4.2.2.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon.....	164
4.2.2.2 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon .....	165
4.2.3 Yüksek kükürt içeren kömürlerin zenginleştirilmesi ve modellemesi ....	165
4.2.3.1 Yanabilir verim için model denklemi.....	168
4.2.3.2 Ayırma verimi için model denklemi .....	177
4.2.3.3 Kükürt uzaklaştırma oranı için model denklemi.....	186
4.2.3.4 Ayırma etkinliği yönünden inceleme .....	195
4.2.4 Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirmenin optimizasyonu .....	197
4.2.4.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon.....	197
4.2.4.2 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon .....	198
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>201</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>207</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>217</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>267</b>

## **KISALTMALAR**

**YYY** : Yanıt yüzeyi yöntemi

**MKT** : Merkezi kompozit tasarım

**G** : Oransal santrifüj kuvvet

**PKO** : Pülpte katı oranı (%)

**BH** : Besleme hızı (l/dk.)

**BM** : Besleme miktarı (l)

**KDK** : Katyon değiştirme kapasitesi (meq/100 g)



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Falcon C ayırıcılarının kullanıldığı tesislerden örnekler.....	42
Çizelge 2.2 : Farklı sayıdaki değişkenler için $n_0$ ve $\alpha$ 'nın değerleri. ....	52
Çizelge 2.3 : Değişkenlerin kod ve gerçek değerleri.....	53
Çizelge 3.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan bentonitin kimyasal analiz sonuçları. ....	68
Çizelge 3.2 : Deneysel çalışmalarda kullanılan temiz kömürün kimyasal analiz sonuçları. ....	69
Çizelge 3.3 : Kil zenginleştirme deneyleri bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.....	72
Çizelge 3.4 : Kil zenginleştirme deneyleri için bağımsız değişkenler ve seviyeleri. ....	72
Çizelge 3.5 : Kil zenginleştirme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar... ..	73
Çizelge 3.6 : Kömür zenginleştirme deneyleri bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri. ....	73
Çizelge 3.7 : Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri. ....	74
Çizelge 3.8 : Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar .....	74
Çizelge 3.9 : Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.....	75
Çizelge 3.10 : Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar .....	75
Çizelge 3.11 : ANOVA tablosu .....	77
Çizelge 3.12 : Laboratuvar ölçekli L40 model Falcon ayırıcısı spesifikasyonları.....	91
Çizelge 3.13 : L40 G tablosu .....	92
Çizelge 4.1 : Kil zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların (KDK ve $d_{90}$ ) gerçek değerleri. ....	94
Çizelge 4.2 : Kil zenginleştirme deneylerinde $d_{90}$ için ikinci dereceden iki, üç ve dört değişkenli model denklemleri. ....	95
Çizelge 4.3 : Kil zenginleştirme deneylerinde KDK için ikinci dereceden iki, üç ve dört değişkenli model denklemleri .....	96
Çizelge 4.4 : Kil zenginleştirme deneylerinde $d_{90}$ modeli için varyans analizi (ANOVA).....	98
Çizelge 4.5 : Kil zenginleştirme deneylerinde KDK modeli için varyans analizi (ANOVA).....	99
Çizelge 4.6 : Kil zenginleştirme deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması. ....	100
Çizelge 4.7 : En iyi ayırma şartlarını sağlayan bağımsız değişkenlerinin en düşük ve en yüksek değerleri. ....	111
Çizelge 4.8 : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon.....	116
Çizelge 4.9 : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan $d_{90}$ ve KDK değerleri. ....	116
Çizelge 4.10 : Bağımsız değişkenlerin $d_{90}$ boyutu için optimum şartları. ....	117

<b>Çizelge 4.11</b> : Bağımsız değişkenlerin KDK boyutu için optimum şartları .....	117
<b>Çizelge 4.12</b> : Örtüşen grafik çiziminde yararlanılan bağımsız değişken şartları. ..	118
<b>Çizelge 4.13</b> : Yanıt değişkenlerinin değerleri. ....	120
<b>Çizelge 4.14</b> : Çekicilik fonksiyonu ile değişkenlerin optimizasyonu.....	120
<b>Çizelge 4.15</b> : Kil zenginleştirme deneylerinde farklı koşullarda elde edilen boyut ile ayırma hassasiyeti değerleri. ....	121
<b>Çizelge 4.16</b> : Yüksek kül içerikli kömür ile yapılan zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların gerçek değerleri. ....	125
<b>Çizelge 4.17</b> : Isıl değer modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	126
<b>Çizelge 4.18</b> : Isıl değer için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	127
<b>Çizelge 4.19</b> : Yanabilir verim modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	135
<b>Çizelge 4.20</b> : Yanabilir verim için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması	137
<b>Çizelge 4.21</b> : Temiz kömür verimi modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	145
<b>Çizelge 4.22</b> : Temiz kömür verimi için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	146
<b>Çizelge 4.23</b> : Kül uzaklaştırma oranı modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	154
<b>Çizelge 4.24</b> : Kül uzaklaştırma oranı için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması. ....	155
<b>Çizelge 4.25</b> : Yüksek küllü kömür zenginleştirme için ayırma etkinliği değerleri.	163
<b>Çizelge 4.26</b> : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon. ....	164
<b>Çizelge 4.27</b> : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan yanıt değişken değerleri. ...	166
<b>Çizelge 4.28</b> : Yüksek küllü kömür zenginleştirme için çekicilik fonksiyonu ile yanıt değişkenlerin optimizasyonu. ....	166
<b>Çizelge 4.29</b> : Yanıt değişkenlerinin değerleri. ....	167
<b>Çizelge 4.30</b> : Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların gerçek değerleri. ....	167
<b>Çizelge 4.31</b> : Yanabilir verim modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	169
<b>Çizelge 4.32</b> : Yanabilir verim için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	170
<b>Çizelge 4.33</b> : Ayırma verim modeli için varyans analizi (ANOVA). ....	178
<b>Çizelge 4.34</b> : Ayırma verimi için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.....	180
<b>Çizelge 4.35</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı modeli için varyans analizi (ANOVA)..	187
<b>Çizelge 4.36</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması. ....	189
<b>Çizelge 4.37</b> : Yüksek kükürtlü kömür zenginleştirme için ayırma etkinliği değerleri.....	196
<b>Çizelge 4.38</b> : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon. ....	197
<b>Çizelge 4.39</b> : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan yanıt değişken değerleri. ...	198
<b>Çizelge 4.40</b> : Yanıt değişkenlerinin değerleri .....	198
<b>Çizelge 4.41</b> : Yüksek kükürtlü kömür zenginleştirme için çekicilik fonksiyonu ile yanıt değişkenlerin optimizasyonu .....	199
<b>Çizelge 5.1</b> : Kil zenginleştirme için optimum koşullar .....	202
<b>Çizelge 5.2</b> : Yüksek küllü kömür zenginleştirme model analiz sonuçları .....	203
<b>Çizelge 5.3</b> : Yüksek küllü kömür zenginleştirme için optimum koşullar .....	203

Çizelge 5.4 : Yüksek kükürlü kömür zenginleştirme model analiz sonuçları .....	204
Çizelge 5.5 : Yüksek kükürlü kömür zenginleştirme için optimum koşullar .....	205
Çizelge A.1 : Kil zenginleştirme deneyleri için metalurjik denge tablosu .....	222
Çizelge A.2 : F testi tablosu (P 0,05 için) .....	223
Çizelge A.3 : 1 nolu deney için dağılım tablosu. ....	224
Çizelge A.4 : 2 nolu deney için dağılım tablosu. ....	225
Çizelge A.5 : 3 nolu deney için dağılım tablosu. ....	226
Çizelge A.6 : 4 nolu deney için dağılım tablosu. ....	227
Çizelge A.7 : 5 nolu deney için dağılım tablosu. ....	228
Çizelge A.8 : 6 nolu deney için dağılım tablosu. ....	229
Çizelge A.9 : 7 nolu deney için dağılım tablosu. ....	230
Çizelge A.10 : 8 nolu deney için dağılım tablosu. ....	231
Çizelge A.11 : 9 nolu deney için dağılım tablosu. ....	232
Çizelge A.12 : 10 nolu deney için dağılım tablosu. ....	233
Çizelge A.13 : 11 nolu deney için dağılım tablosu. ....	234
Çizelge A.14 : 12 nolu deney için dağılım tablosu. ....	235
Çizelge A.15 : 13 nolu deney için dağılım tablosu. ....	236
Çizelge A.16 : 14 nolu deney için dağılım tablosu. ....	237
Çizelge A.17 : 15 nolu deney için dağılım tablosu. ....	238
Çizelge A.18 : 16 nolu deney için dağılım tablosu. ....	239
Çizelge A.19 : 17 nolu deney için dağılım tablosu. ....	240
Çizelge A.20 : 18 nolu deney için dağılım tablosu. ....	241
Çizelge A.21 : 19 nolu deney için dağılım tablosu. ....	242
Çizelge A.22 : 20 nolu deney için dağılım tablosu. ....	243
Çizelge A.23 : 21 nolu deney için dağılım tablosu. ....	244
Çizelge A.24 : 22 nolu deney için dağılım tablosu. ....	245
Çizelge A.25 : 23 nolu deney için dağılım tablosu. ....	246
Çizelge A.26 : 24 nolu deney için dağılım tablosu. ....	247
Çizelge A.27 : 25 nolu deney için dağılım tablosu. ....	248
Çizelge A.28 : 26 nolu deney için dağılım tablosu. ....	249
Çizelge A.29 : 27 nolu deney için dağılım tablosu. ....	250
Çizelge A.30 : 28 nolu deney için dağılım tablosu. ....	251
Çizelge A.31 : 29 nolu deney için dağılım tablosu. ....	252
Çizelge A.32 : 30 nolu deney için dağılım tablosu. ....	253
Çizelge A.33 : 31 nolu deney için dağılım tablosu. ....	254
Çizelge A.34 : 32 nolu deney için dağılım tablosu. ....	255
Çizelge A.35 : 33 nolu deney için dağılım tablosu. ....	256
Çizelge A.36 : 34 nolu deney için dağılım tablosu. ....	257
Çizelge A.37 : 35 nolu deney için dağılım tablosu. ....	258
Çizelge A.38 : 36 nolu deney için dağılım tablosu. ....	259
Çizelge A.39 : 37 nolu deney için dağılım tablosu. ....	260
Çizelge A.40 : 38 nolu deney için dağılım tablosu. ....	261
Çizelge A.41 : 39 nolu deney için dağılım tablosu. ....	262
Çizelge A.42 : 40 nolu deney için dağılım tablosu. ....	263
Çizelge A.43 : 41 nolu deney için dağılım tablosu. ....	264
Çizelge A.44 : Yüksek kül içeren kömür zenginleştirme için yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri kullanılarak yapılan optimizasyon .....	265
Çizelge A.45 : Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme için yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri kullanılarak yapılan optimizasyon .....	266





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Santrifüj kuvvetin çökme hızına etkisi. ....	16
Şekil 2.2 : Ferrara tüpünün şematik gösterimi. ....	17
Şekil 2.3 : Akışkanlaştırma yatağı olan geliştirilmiş gravite ayırıcısı. ....	18
Şekil 2.4 : MGS ayırıcısının şematik görünüşü. ....	21
Şekil 2.5 : MGS'nin şematik görünümü. ....	21
Şekil 2.6 : Pilot ölçekli MGS cihazı. ....	23
Şekil 2.7 : Endüstriyel ölçekli MGS cihazı. ....	23
Şekil 2.8 : Kelsey jigi şematik görünümü. ....	24
Şekil 2.9 : Kelsey Jigi tekne mekanizması. ....	25
Şekil 2.10 : Endüstriyel Kelsey jigleri. ....	26
Şekil 2.11 : Standart tip Knelson ayırıcısı. ....	28
Şekil 2.12 : Knelson ayırıcısı ayırma haznesi. ....	28
Şekil 2.13 : Knelson ayırıcısı konsantre devresi. ....	30
Şekil 2.14 : Knelson ayırıcısı konsantre temizleme devresi. ....	31
Şekil 2.15 : Falcon SB ayırıcısının şematik görünümü. ....	31
Şekil 2.16 : Falcon SB ayırıcısı ayırma haznesi. ....	33
Şekil 2.17 : Falcon SB ayırıcısının ayırma zonlarının şematik görünümü. ....	34
Şekil 2.18 : Falcon SB ayırıcısında zenginleştirmenin şematik görünümü. ....	35
Şekil 2.19 : Falcon ayırıcısı şematik görünümü. ....	36
Şekil 2.20 : Falcon UF ayırıcısı şematik görünümü. ....	37
Şekil 2.21 : Falcon C400 ayırıcısı şematik görünümü. ....	38
Şekil 2.22 : Falcon ayırıcısında tabakalaşmanın şematik gösterimi. ....	39
Şekil 2.23 : Katı transfer olukları. ....	39
Şekil 2.24 : Esnek vana-nozul düzeneği. ....	40
Şekil 2.25 : Esnek vanaların açma-kapama şekilleri. ....	40
Şekil 2.26 : Falcon ayırıcısında zenginleştirmenin şematik görünümü. ....	41
Şekil 2.27 : Deneysel strateji. ....	45
Şekil 2.28 : İki değişkenli ikinci derece ile tanımlanan bazı yüzey örnekleri. ....	50
Şekil 2.29 : $k=2$ , $k=3$ ve $k=4$ için merkezi kompozit tasarımı. ....	52
Şekil 3.1 : Reşadiye bentoniti XRD analiz sonuçları. ....	68
Şekil 3.2 : Kil numunesinin tane boyut dağılımı eğrisi. ....	68
Şekil 3.3 : Kükürtlü numunelerin tane boyut dağılım eğrileri. ....	69
Şekil 3.4 : Kalıntıların normal olasılık dağılımı. ....	79
Şekil 3.5 : Hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı. ....	80
Şekil 3.6 : Kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi. ....	81
Şekil 3.7 : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiği. ....	82
Şekil 3.8 : Tromp eğrisi. ....	85
Şekil 3.9 : Fritsch tane boyutu ölçüm cihazı. ....	87
Şekil 3.10 : Micromeritics 1340 piknometre. ....	87
Şekil 3.11 : Precisa halojen kurutucu. ....	87
Şekil 3.12 : Katyon değişim kapasitesi belirleme düzeneği. ....	88

Şekil 3.13 : Metilen mavisi testi örneği.....	88
Şekil 3.14 : ELTRA marka C5580 model karbon-kükürt analiz cihazı.....	90
Şekil 3.15 : IKA marka C200 model kalorimetre analiz cihazı.....	90
Şekil 3.16 : Laboratuvar Ölçekli L40 model Falcon ayırıcısı.....	91
Şekil 4.1 : $d_{90}$ boyutu için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	101
Şekil 4.2 : KDK değerlerini için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	101
Şekil 4.3 : $d_{90}$ boyutu için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	102
Şekil 4.4 : KDK için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	102
Şekil 4.5 : $d_{90}$ boyutu için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	102
Şekil 4.6 : KDK için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	103
Şekil 4.7 : $d_{90}$ boyutu için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	103
Şekil 4.8 : KDK için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	103
Şekil 4.9 : G ve PKO'ya göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	104
Şekil 4.10 : G ve besleme hızına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	106
Şekil 4.11 : G ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	107
Şekil 4.12 : PKO ve besleme hızına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	108
Şekil 4.13 : PKO ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	110
Şekil 4.14 : $d_{90}$ için G, PKO, besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	112
Şekil 4.15 : KDK için G, PKO, besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	114
Şekil 4.16 : G ve PKO'ya göre çizilen örtüşen kontur grafikleri.....	118
Şekil 4.17 : Besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen örtüşen kontur grafikleri.....	119
Şekil 4.18 : Optimum çalışma aralıkları.....	119
Şekil 4.19 : Toplu sonuçlar.....	122
Şekil 4.20 : Isıl değer için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	128
Şekil 4.21 : Isıl değer için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	128
Şekil 4.22 : Isıl değer için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	129
Şekil 4.23 : Isıl değer için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	129
Şekil 4.24 : Isıl değer için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	130
Şekil 4.25 : Yanabilir verim için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	137
Şekil 4.26 : Yanabilir verim için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	138
Şekil 4.27 : Yanabilir verim için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	138
Şekil 4.28 : Yanabilir verim için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	139
Şekil 4.29 : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	140
Şekil 4.30 : Temiz kömür verimi için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	146
Şekil 4.31 : Temiz kömür verimi için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	147
Şekil 4.32 : Temiz kömür verimi için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	147
Şekil 4.33 : Temiz kömür verimi için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	148
Şekil 4.34 : Temiz kömür verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	149

<b>Şekil 4.35</b> : Kül uzaklaştırma oranı için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	156
<b>Şekil 4.36</b> : Kül uzaklaştırma oranı için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	156
<b>Şekil 4.37</b> : Kül uzaklaştırma oranı için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	157
<b>Şekil 4.38</b> : Kül uzaklaştırma oranı için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	157
<b>Şekil 4.39</b> : Kül uzaklaştırma oranı için yanı yüzey ve kontur grafikleri.....	158
<b>Şekil 4.40</b> : Kül uzaklaştırma oranının ayırma etkinliğine etkisi.....	164
<b>Şekil 4.41</b> : Yanabilir verimin ayırma verimine etkisi.....	164
<b>Şekil 4.42</b> : Yanabilir verim için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	171
<b>Şekil 4.43</b> : Yanabilir verim için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	172
<b>Şekil 4.44</b> : Yanabilir verim için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	172
<b>Şekil 4.45</b> : Yanabilir verim için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	172
<b>Şekil 4.46</b> : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	174
<b>Şekil 4.47</b> : Ayırma verimi için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	180
<b>Şekil 4.48</b> : Ayırma verimi için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	181
<b>Şekil 4.49</b> : Ayırma verimi için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	181
<b>Şekil 4.50</b> : Ayırma verimi için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	181
<b>Şekil 4.51</b> : Ayırma verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.....	183
<b>Şekil 4.52</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.....	188
<b>Şekil 4.53</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.....	189
<b>Şekil 4.54</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.....	190
<b>Şekil 4.55</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.....	190
<b>Şekil 4.56</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı için yanı yüzey ve kontur grafikleri.....	192
<b>Şekil 4.57</b> : Kükürt uzaklaştırma oranı ve ayırma etkinliği grafiği.....	197
<b>Şekil 4.58</b> : Tüvenan kükürt içeriği ve ayırma etkinliği grafiği.....	197
<b>Şekil A.1</b> : %10 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	218
<b>Şekil A.2</b> : %20 Küllü, -106 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	218
<b>Şekil A.3</b> : %20 Küllü, -212 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	219
<b>Şekil A.4</b> : %30 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	219
<b>Şekil A.5</b> : %30 Küllü, -300 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	220
<b>Şekil A.6</b> : %40 Küllü, -106 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	220
<b>Şekil A.7</b> : %40 Küllü, -212 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	221
<b>Şekil A.8</b> : %50 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi.....	221
<b>Şekil A.9</b> : 1 nolu deney için dağılım eğrisi.....	224
<b>Şekil A.10</b> : 2 nolu deney için dağılım eğrisi.....	225

Şekil A.11 : 3 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	226
Şekil A.12 : 4 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	227
Şekil A.13 : 5 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	228
Şekil A.14 : 6 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	229
Şekil A.15 : 7 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	230
Şekil A.16 : 8 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	231
Şekil A.17 : 9 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	232
Şekil A.18 : 10 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	233
Şekil A.19 : 11 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	234
Şekil A.20 : 12 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	235
Şekil A.21 : 13 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	236
Şekil A.22 : 14 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	237
Şekil A.23 : 15 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	238
Şekil A.24 : 16 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	239
Şekil A.25 : 17 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	240
Şekil A.26 : 18 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	241
Şekil A.27 : 19 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	242
Şekil A.28 : 20 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	243
Şekil A.29 : 21 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	244
Şekil A.30 : 22 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	245
Şekil A.31 : 23 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	246
Şekil A.32 : 24 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	247
Şekil A.33 : 25 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	248
Şekil A.34 : 26 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	249
Şekil A.35 : 27 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	250
Şekil A.36 : 28 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	251
Şekil A.37 : 29 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	252
Şekil A.38 : 30 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	253
Şekil A.39 : 31 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	254
Şekil A.40 : 32 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	255
Şekil A.41 : 33 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	256
Şekil A.42 : 34 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	257
Şekil A.43 : 35 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	258
Şekil A.44 : 36 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	259
Şekil A.45 : 37 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	260
Şekil A.46 : 38 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	261
Şekil A.47 : 39 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	262
Şekil A.48 : 40 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	263
Şekil A.49 : 41 nolu deney için dağılım eğrisi. ....	264

# FALCON SANTRİFÜJLÜ GRAVİTE AYIRICISINDA ZENGİNLEŞTİRMENİN MODELLENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada, cevher hazırlama endüstrisinde yeni sayılan geliştirilmiş gravite ayırıcılarından Falcon ayırıcısı ile kil ve kömür zenginleştirme deneyleri yapılmış ve bağımsız değişkenlerin hem birbirleri ile olan etkileşimleri hem de zenginleştirmeye etkileri analiz edilerek zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonunun yapılması amaç edinilmiştir.

Deneysel çalışmalar istatistiksel deney tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı, merkezi kompozit tasarımı ile yapılmıştır. Kil zenginleştirme deneylerinde bağımsız değişkenler olarak oransal santrifüj kuvvet (G değeri), pülp katı oranı (PKO), besleme hızı ve besleme miktarı seçilmiştir. Yanıt değişkenlerinin elde edilen ürünlerin  $d_{90}$  ve katyon değiştirme kapasiteleri (KDK) olmasına karar verilmiştir. Kömür zenginleştirme deneylerinde ise G, PKO, tane boyutu, besleme hızı ve içerik (kül uzaklaştırma deneyleri için kül içeriği, kükürt uzaklaştırma deneyleri için kükürt içeriği) bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Kül uzaklaştırma deneyleri için seçilen yanıt değişkenleri, ısı değeri, yanabilir verim, temiz kömür verimi, kül uzaklaştırma oranı iken kükürt uzaklaştırma deneyleri için yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma oranı seçilmiştir. Deneyler sonucu elde edilen verilerle zenginleştirmeleri tanımlayan modeller üretilmiştir. Bu modeller yanıt yüzeyi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve optimizasyonu yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile yapılmıştır. Oluşturulan modellerin deneysel verileri ne ölçüde karşıladığı varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Bu yöntemle her bir faktörün yanıtlar üzerindeki istatistiksel önemlilikleri %95 güvenlik seviyesinde Fischer (F) testi uygulanarak bulunmuştur. Model değerleri ile gerçek değerler karşılaştırılarak regresyon ( $R^2$ ) ve korelasyon (R) katsayılarına bakılmıştır. Deney tasarımı, yanıtların analizi, modelleme ve grafiklerin çizimi Minitab® 15 bilgisayar programı ile yapılmıştır.

Kil zenginleştirme deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak  $d_{90}$  boyutu ve KDK için model denklemler geliştirilmiştir. Model denklemlerle elde edilen tahmini  $d_{90}$  ve KDK değerleri ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları;  $d_{90}$  boyutu için, F değeri 3,14, Prob>F değeri 0,016,  $R^2$  0,73, korelasyon katsayısı 0,856, KDK için, F değeri 5,05, Prob>F değeri 0,001,  $R^2$  0,82, korelasyon katsayısı 0,903 olarak bulunmuştur. Model optimizasyon sonuçları, 300 G, % 6 PKO, 1 litre/dakika besleme hızı ve 3,5 litre besleme miktarı olarak bulunmuştur.

Ayrıca Falcon ayırıcısının, mineraller arası özgül ağırlık farkı varsa, özgül ağırlığa göre, yoksa tane boyutuna göre ayırma yaptığı, aynı yoğunluklardaki minerallerin ayrılmasında, boyuta göre sınıflandırma cihazı gibi çalıştığı yapılan deneylerle anlaşılmıştır.

Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak ısıl değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi, kül uzaklaştırma oranı için model denklemler geliştirilmiştir. Model denklemlerle elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları ısıl değer için, F değeri 39,23, Prob>F değeri <0,001, R<sup>2</sup> 0,986, korelasyon katsayısı 0,993, yanabilir verim için, F değeri 14,13, Prob>F değeri <0,001, R<sup>2</sup> 0,963, korelasyon katsayısı 0,981, temiz kömür verimi için, F değeri 23,07, Prob>F değeri <0,001, R<sup>2</sup> 0,977, korelasyon katsayısı 0,988, kül uzaklaştırma oranı için, F değeri 5,01, Prob>F değeri <0,001, R<sup>2</sup> 0,903, korelasyon katsayısı 0,950 olarak bulunmuştur. Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi deneyleri modellerinin optimizasyonu sonucu 100 G, % 10 PKO, -0,300 mikron tane boyutu, 0,5 litre/dakika besleme hızı ve %10 kül miktarı ve 300 G, % 30 PKO, -106 mikron tane boyutu, 3,5 litre/dakika besleme hızı ve %10 kül miktarı olarak yüksek ve düşük G değerleri için iki optimum koşul bulunmuştur.

Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilmesi deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi ile kullanılarak yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma oranı için model denklemler geliştirilmiştir. Model denklemlerle elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları yanabilir verim için, F değeri 3,75, Prob>F değeri 0,014, R<sup>2</sup> 0,872, korelasyon katsayısı 0,934, ayırma verimi için, F değeri 4,95, Prob>F değeri 0,005, R<sup>2</sup> 0,90, korelasyon katsayısı 0,95, kükürt uzaklaştırma oranı için, F değeri 9,41, Prob>F değeri <0,001, R<sup>2</sup> 0,945, korelasyon katsayısı 0,972 olarak bulunmuştur. Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilmesi deneyleri modellerinin optimizasyonu sonucu 300 G, % 35 PKO, -0,038 mikron tane boyutu, 2,0 litre/dakika besleme hızı ve %3,0 kükürt miktarı ve 300 G, % 30 PKO, -106 mikron tane boyutu, 3,5 litre/dakika besleme hızı ve %10 kül miktarı olarak bulunmuştur.

## **MODELING OF CONCENTRATION ON FALCON CENTRIFUGAL GRAVITY SEPARATOR**

### **SUMMARY**

In this study, clay and coal concentration experiments have been accomplished by using Falcon gravity concentrator which is considered a new enhanced gravity separator in mineral processing industry. Thereafter, the interaction of independent variables with each other and the effects of them on concentration were analyzed, the modeling and optimization studies were done by using experimental data's.

The experimental studies are realized by using statistical experiment design methods. Central composite design was used as for experiment design. G value, solid in pulp, feed amount and feed rate were chosen as independent variables in clay concentration experiments.  $d_{90}$  sizes and cations exchange capacities (CEC) of products are chosen as respond variables. In coal concentration experiments, G, solid in pulp, particle size, feed rate and content (ash content for ash removal experiments, sulfur content for sulfur removal experiments) were chosen as independent variables. While respond variables which are chosen for ash removal experiments are calorific value, combustible recovery, clean coal recovery and ash removal recovery, combustible recovery, separation recovery and sulfur removal recovery were chosen as respond variables in sulfur removal experiments. At the end of experiments, by using test data's some models which describe concentration are produced. These models were analyzed with response surface methods and optimization was realized by response surface and contour graphics. Variance analyze (ANOVA) was used to detect harmony of generated models with experimental data's. By using Fischer (F) test, statistical momentousness of each factor on responses is found about 95% safety level.  $R^2$  and correlation factors were examined by comparing model values and real values. Experimental design, response analyze, modeling and graphics are done with Minitab® 15 computer program.

In clay concentration experiments response surface method was used and model equations were produced for  $d_{90}$  and CEC. It was proved that estimated  $d_{90}$  and CEC values which are generated by model equations are compatible with experimental values. For  $d_{90}$ , F value 3.14, Prob>F value 0.016,  $R^2$  0.73, correlation factor 0.856 and for CEC, F value 5.05, Prob>F value 0.001,  $R^2$  0.82, correlation factor 0.903 were found in variance analyze results. Model optimization results are 300 G, 6% solid in pulp, 1 L/min. feed rate and 3.5 L feed amount.

At the end of the experiments, it was inferred that Falcon works as gravity concentrator while there is a specific gravity difference between separated minerals. Also, it separates minerals according to their particle size if there is not a specific gravity difference.

In experiments where high ash content coal were concentrated different model equations were generated for calorific value, combustible recovery, clean coal

recovery, ash removal recovery by using surface respond method. It was seen that estimated values from model equations are compatible with experimental values. For calorific value, F value 39.23, Prob>F value <0.001,  $R^2$  0.986, correlation factor 0.993, for combustible recovery, F value 14.13, Prob>F value <0.001,  $R^2$  0.963, correlation factor 0.981, for clean coal recovery, F value 23.07, Prob>F value <0.001,  $R^2$  0.977, correlation factor 0.988, for ash removal recovery, F value 5.01, Prob>F value <0.001,  $R^2$  0.903, correlation factor 0.950 were found in variance analyze results. At the end of the optimization of models for high ash content coals two different optimum experiment conditions were found as G values. These are 100 G, 10% solid in pulp, - 300 microns particle size, 0.5 L/min. feed rate and 10% ash amount for low G value , 300 G, 30% solid in pulp, - 106 microns particle size, 3.5 L/min. feed rate and 10% ash amount for high G value.

In experiments where high sulfur content coal were concentrated different model equations were generated for combustible recovery, concentration recovery and ash removal recovery by using surface respond method. It was seen that estimated values from model equations are compatible with experimental values. For combustible recovery, F value 3.75, Prob>F value 0.014,  $R^2$  0.872, correlation factor 0.934, for concentration recovey, F value 4.95, Prob>F value <0.005,  $R^2$  0.90, correlation factor 0.95, ash removal recovery, F value 9.41, Prob>F value <0.001,  $R^2$  0.945, correlation factor 0.972 were found in variance analyze results. At the end of the optimization of models for high sulfur content coals two different optimum experiment conditions were found. First of them is 300 G, 35% solid in pulp, - 38 microns particle size, 2.0 L/min. feed rate and 3% sulfur amount and the second is 300 G, 30% solid in pulp, - 106 microns particle size, 3.5 L/min. feed rate and 10% sulfur amount.



## 1. GİRİŞ

Cevher hazırlama endüstrisinde amaç, kıymetli minerallerin kıymetsiz olanlardan mümkün olduğu kadar yüksek verim ve istenilen içerikte ayırmaktır. Bu ayırma yani zenginleştirme işlemleri fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal yöntemlerle yapılmaktadır. Fiziksel yöntemlerden birisi de, ayrılması istenen mineraller arası özgül ağırlık farklılığından yararlanılarak yapılan gravite ile zenginleştirme yöntemidir.

Gravite yöntemi ile zenginleştirme, düşük maliyetli zenginleştirme proseslerinden biridir. Yüksek etkinlikleri ve düşük maliyetlerinden dolayı cevher ve kömür hazırlamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002). Ancak tane boyutunun çok incelendiği durumlarda da (-0,1 mm) zenginleştirmede faydalanan hidrodinamik kuvvetlerin etkisi oldukça azalmakta ve gravite ile zenginleştirmenin ayırma verimi düşmektedir (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002). Aynı zamanda, kömür endüstrisinde işletme maliyetlerini minimize etmek için ince boyutlu kömürlerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle ince boyutlu mineral tanelerinin birbirlerinden ayrılabilmesi için santrifüj kuvvetlerinden yararlanılmaktadır (Xiao, 1998).

Son dönemlerde kullanımı sıklaşan ve özellikle çok ince ve şlam boyutundaki cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılan santrifüjlü ayırıcılar, santrifüj kuvvetini taneciklerin çökme hızını yükseltmek için kullanan geliştirilmiş gravite ayırıcılarıdır. Taneciklerin çökme hızının santrifüj kuvvetle artırılmasının kullanımı uzun yıllardır hidrosiklonlardaki klasifikasyon ve dinamik ağır ortam ayırmasında kullanılmaktadır (Burt ve diğ., 1995).

Modern, geliştirilmiş gravite ayırıcılarının mineral endüstrisine girişiyle çok ince boyutlu cevherlerin gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesi ve kıymetli minerallerin geri kazanımı mümkün olmuştur. Yakın zamana kadar yüksek kapasiteli gravite ayırıcıları 100 mikron'dan daha küçük tane boyutlarında verimli değil iken, geçtiğimiz bir kaç on yılda normalde köpük flotasyonu ile zenginleştirilebilen tane boyutlarında verimli ayırma yapabilen çeşitli geliştirilmiş gravite ayırıcıları

geliştirilmiştir (Liu ve diğ., 2006, Gee ve diğ., 2005, Honaker ve diğ., 2000, Venkatraman ve diğ., 1995). Çok ince boyutlu taneciklerin ayrılmasına yönelik olarak santrifüj kuvvetinden yararlanan cihazlar tasarlanmıştır. Bu cihazlar Multi Gravite ayırıcısı (MGS) (Bhaskar ve diğ., 2002, Chan ve diğ., 1989, 1991a, 1991b, Cordingley, 1997, Traore ve diğ., 1995, Tucker ve diğ., 1991, Yerriswamy ve diğ., 2003), Kelsey jigi (Malvik ve diğ., 1997, Tucker, 1995, Majumder ve diğ., 2007a, 2007b), Knelson (Ancia ve diğ., 1997, Caceres ve diğ., 1996, Houseley ve diğ., 1997, Huang, 1996, Knelson, 1988, 1992, Knelson ve Jones, 1993, Laplante, 1995, Majumder ve Barnwal, 2008, Majumder ve diğ., 2007a) ve Falcon (Ancia ve diğ., 1997, Gee ve diğ., 2005, Honaker ve diğ., 1996, Laplante ve diğ., 1994, 2002, Laplante, 1995, Xiao, 1998) ayırıcılarıdır. Bu ayırıcılardan Knelson ve Falcon ayırıcıları 38 mikron, hatta daha ince boyutlu tanelerin zenginleşmesini sağladıklarından, özellikle altın zenginleştirmede oldukça başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar (Ancia ve diğ., 1997, Knelson, 1988, 1992, Knelson ve Jones, 1993, Laplante, 1993, 1995, Xiao, 1998). Bu ayırıcıların kullanıldığı araştırmalarda, bu ayırıcıların sadece altın kazanımı değil, çok çeşitli alanlardaki kullanımlarına değinilmiş ve çeşitli cevherler, kömür ve geri kazanım alanlarında uygulanabilirliği ortaya konmuştur. (Abela, 1997, Burt, 1992, 1997, Luttrell ve diğ., 1995, Honaker ve diğ., 1995, 1995, 1995, 1996, 1998, Honaker ve Patil, 2002, Majumder ve Barnwal, 2006, Majumder ve diğ., 2007a, 2007b).

Falcon ve Knelson ayırıcısı, özellikle, çok küçük boyutlu altın cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılmaya başlanmış, gün geçtikçe şlam boyutundaki cevherler, çeşitli artık, pasa ve ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır (Ancia, 1997, Houseley ve diğ., 1997, Honaker ve Das, 2004).

Özellikle son yıllarda yükselen değer olan çevre korumaya yönelik tekrar yapılandırılan çevre yönetmelikleri ve izin verilen işletme koşulları daha da zorlayıcı oldukça, geliştirilmiş gravite ayırıcıları bazı cevherler için uygulanabilir yegane ekonomik teknoloji haline gelebilir (Url-1). Hem ucuz hem de çevre dostu olması dünya genelinde bu cihazlara olan ilgiyi artırmış ve birçok tesiste çeşitli cevherler için kullanılmaya başlanmıştır.

Ancak yeni bir teknolojinin veya cihazın ister yeni bir tesiste kullanılacak, isterse hali hazırda işletilen bir tesise adapte edilecek olsun, çalışma koşullarının, prosese

uyumluluğunun ve beklentileri karşılayıp karşılayamayacağını anlaşılması için cihaz veya teknoloji üzerine yapılacak birçok çalışma gerektirir. Özellikle ekonomik baskılar, proses geliştirme araştırmalarında yapılan deneyleri tasarlamak için, en çok bilgiyi en kısa sürede, en az maliyet ve işgücüyle elde edilmesini şart koşturmaktadır. Ancak, yeni bir teknolojinin veya cihazın anlaşılabilirliği için incelenmesi gereken pek çok etken parametre mevcut olmaktadır.

Deney tasarımı için geleneksel yöntemlerin zorlukları, bu konuda yeni yöntemlerin gelişmesine neden olmuştur. En az deneysel çalışma ile en çok verinin toplanabilmesi, özellikle çok sayıda parametrenin sonuç üzerine etkili olduğu sistemler için, parametrelerin birbiri üzerine etkilerini de ortaya koymak üzere geliştirilmiş olan istatistiksel yöntemler kullanarak ve deney tasarımı ve sonuçların yorumlayarak mümkün olmaktadır. Ayrıca, bu yöntemler kullanılarak yapılan modelleme ve/veya optimizasyon çalışmaları ile proseslerin iyileştirmesini sağlarken, aynı zamanda malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır.

Deneysel çalışmaların tasarlanması optimizasyonunda kullanılan tasarım türleri uygun bir yazılıma sahip paket programlar yardımıyla oldukça anlaşılır ve kolay hale gelmiştir. Söz konusu yazılımların bünyesinde oldukça fazla sayıda ve ihtiyaca göre düzenlenmiş yanıt yüzeyi yöntemleri mevcuttur. Bunlar arasında en çok kullanılan tasarım çeşidi merkez kompozit tasarımı olarak da bilinen MKT'dir (Montgomery, 2009, Lazic, 2004, Antony, 2003).

Yabancı literatürde yanıt yüzeyi yöntemleri uzun yıllardır endüstride geniş çaplı olarak kullanıldığı gibi cevher hazırlamanın da hemen hemen her konusunda kullanılmaktadır. Özellikle birçok parametrenin birlikte incelenmesinin tesis verimi ve işletme maliyetleri açısından önemli olduğu bu sektörde, deneysel tasarım kullanılarak kısa zamanda az deneyle çok bilgi elde etmenin önemi anlaşılmakta ve başarılı şekillerde uygulanmaktadır. Ülkemizde deneysel ve endüstriyel araştırmalarda matematiksel ve istatistiksel yöntemler ve deney tasarım yöntemleri yaygın olarak uygulanmamaktadır. Birçok sektör ve bilim dalında (Alademir, 2008, Soyer, 2008, Köroğlu, 2007, Özyurt, 2006, Turhan, 2006, Bektaş, 2006, Kul, 2004, Özler, 1997, Güvenç, 2004) olduğu gibi cevher hazırlama konularında yapılan çalışmalarda da yanıt yüzeyi yöntemlerinin kullanıldığı araştırmaların (Aslan, 2007a, 2007b, Aslan ve Cebeci, 2007, Aslan ve diğ., 2008, Aslan ve Ünal, 2009, Özgen ve diğ., 2009, Oruç ve diğ., 2010, Celep ve diğ., 2011, Boylu, 2011) sayısı oldukça

sınırlı olup, son on yıl içerisinde deney tasarımı ve sonuçlarının optimize edilmesinde yanıt yüzeyi yöntemlerinin kullanımı artış göstermiştir. Ancak ülkemizde zaman ve bilginin çok önemli olduğu günümüzde istatistiksel deney tasarıma gereken ölçüde önem verilmemektedir.

Bu çalışmada, cevher hazırlama endüstrisinde yeni sayılan geliştirilmiş gravite ayırıcılarından Falcon ayırıcısı ile kil ve kömür zenginleştirme deneyleri yapılmış ve bağımsız değişkenlerin hem birbirleri ile olan etkileşimleri hem de zenginleştirmeye etkileri analiz edilerek zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonunun yapılması amaç edinilmiştir. Zenginleştirmeler için belirlenecek çalışma şartlarının daha sonra yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Ayrıca, endüstriyel ve bilimsel araştırmalarda istatistiksel deney tasarımı kullanımının fayda ve öneminin anlaşılması açısından da bu tez çalışmasının ayrı bir önemi vardır.

Bu çalışma, kil minerallerinin ve kömürün Falcon ayırıcısı ile zenginleştirilmesi deneylerini, yapılan zenginleştirme deneylerinin modellenmesi ve optimizasyonu çalışmalarını ve bu çalışmaların sonuçlarını kapsamaktadır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Cevher hazırlama endüstrisinde ana amaç, kıymetli minerallerin kıymetsiz olanlardan, mümkün olduğu kadar yüksek verim ve istenilen içerikte ayırmaktır. Bu ayırma yani zenginleştirme işlemleri fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal yöntemlerle yapılmaktadır. Fiziksel yöntemlerden birisi de, ayrılması istenen mineraller arası özgül ağırlık farklılığından yararlanılarak yapılan zenginleştirme yöntemidir.

Gravite ile zenginleştirme yöntemleri, aralarında özgül ağırlık farkı olan mineralleri yer çekimi ve bir veya birkaç başka kuvvete karşı gösterdikleri tepkilerine göre oluşan bağıl hızlarını kullanarak ayırır. Bu tepkiler çoğunlukla su, hava veya ağır ortam gibi bir akışkanın yarattığı harekete karşı gösterilen dirençtir (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002).

Gravite yöntemi ile zenginleştirme, ucuz zenginleştirme proseslerinden biridir. Yüksek etkinlikleri ve düşük maliyetlerinden dolayı cevher ve kömür hazırlamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002, Honaker ve diğ., 1996). Minerallerin serbestleşme tane boyutunun büyüklüğüne bağlı olarak, tek başlarına veya kombinasyon şeklinde kullanılırlar.

Gravite ile zenginleştirme cihazlarından sarsıntılı masa, ağır ortam siklonu, spiraller, Wemco tamburu, Reichert konisi ve jigler gibi birçok cihaz, dünya genelinde birçok cevher hazırlama tesisinde kullanılmaktadır (Mishra ve Mehrotra, 1998, 2001). Ancak, geleneksel gravite işlemlerinde, cevherdeki kıymetli mineralin yeterli derecede serbestleşmesi ve ayrılacak minerallerin özgül ağırlıkları arasında yeterli fark olması gerekmektedir. Ayrıca gravite yöntemlerinin diğer zenginleştirme yöntemlerine göre, gerek işletme, gerekse yatırım maliyetleri açısından oldukça ucuz olmasına karşılık, zenginleştirmedeki metal kazanma verimlerinin düşük olabilmesi, şlam boyutuna yakın boyutlarda kaçakların önlenememesi ve selektif ayırmaya tam uyum sağlayamaması da graviteyle zenginleştirmenin dezavantajını oluşturmaktadır. (Ancia ve diğ., 1997, Traore ve diğ., 1995, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002).

Çok küçük boyutlu taneler içeren değerli minerallerin, özellikle gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesi cevher hazırlama endüstrisi için zor bir problem olmaktadır. Tane boyutunun 100 mikrondan küçük olduğu durumlarda, zenginleştirmede faydalanılan hidrodinamik kuvvetlerin çok ince boyutlu mineral tanelerinin birbirlerinden ayrılmasında etkisi oldukça azalmakta ve belirli yoğunluklardaki tanelerin hacmi ile ilişkili kuvvetler üzerinde baskın hale gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı, gravite ile zenginleştirmenin ayırma verimi düşmektedir (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002). Her ne kadar jigler, oluklar, koni ve spiraller, 100 mikronun altında sınırlı olarak çalışıp bir miktar zenginleştirme yapabilseler de, bu cihazların öncelikli amaçları bu boyut gruplarında ayırma yapmak değildir. Bunlardan dolayı, çok küçük boyutlu taneler (-0,1 mm) içeren değerli minerallerin klasik gravite yöntemleri ile verimli olarak zenginleştirilemediği ortaya çıkmaktadır.

İnce ve çok ince boyutlu tanelerin klasik gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesinin çok sorunlu ve genellikle düşük verimlerde olması, şlam ve artıklarda büyük oranlarda kayıplar verilmesi, kaçınılmaz olarak maliyetleri yükselmektedir. Konunun önemini vurgulaması açısından yapılan bir araştırmaya göre, çok değişik alanlarda yapılan cevher hazırlama işlemlerinde % 25'den fazla oranda kıymetli minerallerin ince boyutlarda (şlamda) kaybedildiği ifade edilmektedir. Buna karşın, günümüzde ekonomik zorlamalar nedeniyle maden işletme ve öğütme şartları, düşük tenörlü cevherlerin çok küçük serbestleşme derecelerinde ve büyük tonajlarda çalışılmasını gerektirmektedir. Bu hedefler doğrultusunda, öğütme ve zenginleştirme ünitelerinde yeni teknolojik arayışlar büyük bir hızla sürdürülmektedir (Chan ve diğ., 1991a, 1991b).

Aynı zamanda, kömür endüstrisinde de tam mekanize madencilik tekniklerinin kullanımının artması sonucu kömür üretiminde ince boyutlu (-600 µm) kömür miktarı önemli ölçüde artmıştır. Bu oran neredeyse tesis beslemesinin % 20'sini oluşturmaktadır. Tüvenan kömür, genellikle, jeolojik koşullara ve üretim tekniklerine bağlı olarak % 5-40 arası kül ve % 0,3-8 arası kükürt içerir ve pirit boyutu genellikle 2,5-100 mikron arasında değişir. Zenginleştirme sonucu elde edilen temiz kömürde, daha sıkı çevresel kontrolden dolayı kömürün yanma emisyonunu etkileyen piritin belirli değerler altında olması ve bunun için de diğer empüriteler gibi kömürden uzaklaştırılması gerekmektedir (Honaker ve diğ., 1996).

Bilindiği gibi, geleneksel kömür yıkamada çoğunlukla gravite yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak ince boyutlu kömürün zenginleştirilmesinde, kömür flotasyona uygun ise, yaygın olarak flotasyon yöntemi kullanılmaktadır. Bazı durumlarda, 2,1-2,7 yoğunluklu ve % 5'ten az kömür içeren araürünün (Honaker ve Reed, 1995) ve bazı flotasyon şartlarında kömür piritinin hidrofob özellikte olması nedeniyle yüzmesi, önemli miktarda araürün ve/veya pirit içeren kömürlerin kazanılması için flotasyon yöntemi tek başına yeterli olmamaktadır (Honaker ve diğ., 1996).

Ancak, temiz kömür düşük değerli bir ürün olduğundan, işletme maliyetlerini minimize etmek için tesis verimi maksimize edilmelidir. Bunun için ince boyutlu kömürlerin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Şimdilik, fiziksel temizleme yöntemleri kömür zenginleştirme için en ekonomik yöntemlerdir. Bahsi geçen tüm bu sebeplerden dolayı kömür hazırlama tesislerinin yüksek verimli fiziksel kömür temizleme teknolojilerine ihtiyacı vardır (Honaker ve diğ., 1996).

1960 ve 1970'li yıllarda Bartles Mozley ve Bartles Mozley Crossbelt ayırıcılarının geliştirilmesi ile efektif ayırma boyutu 15 mikronlara kadar düşmüştür. (Burt ve diğ., 1995). Bununla birlikte, en önemli başarılar santrifüj ayırmanın kullanılmaya başlanması ile elde edilmiştir.

Geçtiğimiz on yıllarda bu problemi çözmek için, çok küçük boyutlu cevherlerin değerlendirilmesi üzerine yapılan araştırmalarda, ince boyutlu mineral tanelerinin birbirlerinden ayrılabilmesi için santrifüj kuvvetinden yararlanılmaya çalışılmıştır (Xiao, 1998). Bilindiği gibi, santrifüj kuvvet, taneciklerin çökme hızını yükseltmek için kullanılmaktadır ve taneciklerin çökme hızının santrifüj kuvvetle artırılmasının kullanımı uzun yıllardır hidrosiklonlardaki klasifikasyon ve dinamik ağır ortam ayırmasında kullanılmaktadır (Burt ve diğ., 1995, Burt, 1997).

Bu çalışmalar sonucunda da, 1980'li yılların ortalarında, özellikle çok ince ve şlam boyutundaki cevherlerin zenginleştirilmesinde kullanılmak üzere, santrifüj kuvvetini taneciklerin çökme hızını yükseltmek için kullanan, santrifüjlü ayırıcılar ya da geliştirilmiş gravite ayırıcıları adı altında cihazlar geliştirilmiş ve bu ayırıcılar cevher hazırlama endüstrisine girmişlerdir (Traore ve diğ., 1995, Xiao, 1998, Ling, 1998). Bunlardan bazıları Multi Gavite Ayırıcısı (MGS), Avustralya'da geliştirilen Kelsey jigi, Knelson ayırıcısı, Falcon ayırıcısı ve Çin'de geliştirilen SL tipi devamlı

boşaltmalı santrifüj ayırıcısıdır (Ren ve diğ., 1994). Bunlardan Multi Gravite, Knelson ve Falcon ayırıcıları endüstride daha çok uygulama alanı bulmuşlardır.

Bu ayırıcılarda temel prensip, santrifüj kuvveti sayesinde tanelerin üzerinde gravite kuvvetinin 300 katına kadar varan bir kuvvet yaratıp, geliştirilmiş gravite ortamında tanelerin özgül ağırlıklarına göre davranmalarını sağlamaktır (Luttrell ve diğ., 1995). Bu ayırıcılardan MGS’de taneler yatay akışkan ortamda ayrılmaya tabi tutulurken, Falcon ve Knelson’da ayırma işlemi düşey konumdaki akışkan ortamda gerçekleştirilir. Ayrıca, MGS yatay eksen etrafında dönen tambur tipi bir ayırıcı, Falcon ve Knelson ayırıcılarının ise, “hazne” diye tanımlanan, düşey eksen etrafında dönen kova tipi tasarımı vardır.

Altın endüstrisinde de gravite ile zenginleştirmenin kullanımı 1970’lerden sonra önemli bir artış göstermiştir. Bu artışın sebeplerinden biride, maksimum kazanmanın, prosesin ekonomik gelişmesi için öncelik sırasını kaybettiği, sürdürülebilir kalkınma yönteminin giderek önem kazanmasıdır (Burt, 1999).

Özellikle son yıllarda yükselen değer olan çevre korumaya yönelik tekrar yapılandırılan çevre yönetmelikleri ve izin verilen işletme koşulları daha da zorlayıcı oldukça, geliştirilmiş gravite ayırıcıları bazı cevherler için uygulanabilir yegane ekonomik teknoloji haline gelebilir (Url-1).

Endüstriyel teknolojinin gelişmesi, kullanılan metal ve endüstriyel ham madde gereksinimlerinin artışına neden olmuştur. Gün geçtikçe işletilebilir nitelikteki cevher tenör ve rezervlerinin azaldığı düşünülürse, bu cevherlerin ekonomik bir biçimde en az kaybı verecek şekilde işletilerek ekonomiye kazandırılması büyük önem arz etmektedir. Özellikle işletilebilir cevher tenörlerinde meydana gelen azalma, pek çok araştırmacıyı öncelikle mevcut proseslerde verim kayıplarının önüne geçmek için proses kontrolüne ve iyileştirilmesine, daha sonra da ikincil kaynaklardan ve artıklardan geri kazanım yöntemlerinin araştırılmasına yönelttiği görülmektedir. Önemli diğer bir husus ise artan çevresel duyarlılık nedeni ile sürekli olarak alternatif çevre dostu proseslerin geliştirilmesine yönelik çalışmalarda artış olduğudur. Gelişen teknoloji ve yeni cihazların üretilmesi ile çok ince boyutlu cevherlerin ve artıkların gravite yöntemleri ile kazanılması mümkün olmuştur. Hem ucuz hem de çevre dostu olması, dünya genelinde, bu cihazlara olan ilgiyi artırmış ve birçok tesiste çeşitli cevherler için kullanılmaya başlanmıştır.



Ancak yeni bir teknolojinin veya cihazın ister yeni bir tesiste kullanılacak, isterse hali hazırda işletilen bir tesise adapte edilecek olsun, çalışma koşullarının, prosese uyumluluğunun ve beklentileri karşılayıp karşılayamayacağını anlaşılması cihaz veya teknoloji üzerine yapılacak birçok çalışmayı gerektirir.

Özellikle ekonomik baskılar, endüstride proses geliştirme araştırmalarında yapılan deneyleri tasarlamak için, en çok bilgiyi en az kısa sürede, en az maliyet ve işgücüyle elde edilebilmesini şart koşmaktadır. Ancak, yeni bir teknolojinin veya cihazın anlaşılabilmesi için incelenmesi gereken pek çok etken parametre mevcut olmaktadır (Lynch, 1997, King, 2001).

Geleneksel çalışmalarda, etkin olabilecek parametreler öncelikle tahmin edilir. Daha sonra, söz konusu parametreler ile belirli bir inceleme aralığında çalışılarak en uygun şartların belirlenmesine çalışılır. Geleneksel çalışmalarda, tek bir parametre değişken olarak incelenirken diğer etkin parametreler belirli bir değerde sabit tutulur. Bu tip çalışmalarda, tüm parametrelerin etkilerinin incelenmesi için çok fazla sayıda deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulacağı gibi, özel bazı koşullar haricinde, parametrelerin etkileşimi ortaya koyulamamakta ve deneysel metodu temsil edecek herhangi bir model tanımlaması veya model denklemi oluşturulması mümkün olmamaktadır.

Deney tasarımı için geleneksel yöntemlerin zorlukları, bu konuda yeni yöntemlerin gelişmesine neden olmuştur. En az deneysel çalışma ile en çok verinin toplanabilmesi, özellikle çok sayıda parametrenin sonuç üzerine etkili olduğu sistemler için, parametrelerin birbiri üzerine etkilerini de ortaya koymak üzere geliştirilmiş olan istatistiksel yöntemler kullanarak ve deney tasarımı ve sonuçların yorumlayarak mümkün olmaktadır. Ayrıca, bu yöntemler kullanılarak yapılan modelleme ve/veya optimizasyon çalışmaları ile proseslerin iyileştirilmesi sağlanırken, aynı zamanda malzeme, işçilik ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır.

İstatistiksel temele dayanan kullanılabilir yöntemlerin başında Yanıt Yüzeyi Yöntemleri (YYY, Response Surface Methods) gelmektedir. Yanıt yüzeyi yöntemleri ilk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Box ve Wilson mümkün olan en az sayıda gözlem değeri ile yanıt yüzeyi üzerinde yanıt değişkeninin maksimum değerini aldığı noktaya ulaşılması

amaçlanan deneme düzenlerini ortaya koymuşlardır. Bu amaçla bazı deneme düzenlerini karşılaştırmış ve kompozit denemeleri tanımlamışlardır.

Yanıt yüzeyi yöntemleri model regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir faktörün ana etkisinin veya diğer faktörlerle etkileşiminin yanıt değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir.

Yanıt yüzeyi yöntemleri birçok bilim dalında başarı ile kullanılmaktadır. Yanıt yüzeyi deseni kullanarak iki veya daha fazla faktörün, örneğin zaman, sıcaklık ve ikisinin birlikte sonuç üzerindeki etkileri araştırılıp optimum değerleri bulunabilir. Sonuçlar üç boyutlu grafik halinde veya kontur haritası olarak ifade edilebilir. Oldukça az sayıda deneysel kombinasyon kullanılarak gerçekte test edilmeyen faktör değeri ve bunların kombinasyonları hakkında tahmin yapılabilir (Montgomery, 2009, Lazic, 2004, Antony, 2003).

Yanıt yüzeyi oluşturma amacı, deneysel bir çalışmada sonuç üzerinde etkin olan çok sayıdaki parametreden oluşan bir tasarım düzleminde belirli özellikleri sağlayan bir bölgeyi (etkinliği araştırılan parametreleri kapsayan bir aralık) ve bu bölgeye ait optimum noktayı tahmin etmektir. Elde edilen fonksiyon deneysel verileri temsil etmekle birlikte, model uyumunun fazla olması büyük önem taşımaktadır.

Deneysel çalışmaların tasarlanması, optimizasyonunda kullanılan tasarım türleri, uygun bir yazılıma sahip paket programlar yardımıyla oldukça anlaşılır ve kolay hale gelmiştir. Söz konusu yazılımların bünyesinde oldukça fazla sayıda ve ihtiyaca göre düzenlenmiş yanıt yüzeyi yöntemleri mevcuttur. Bunlardan bazıları, faktöriyel tasarım, merkezi kompozit tasarımı (MKT, Central Composite Design), Box-Behnken tasarımı, 3 düzeyli tasarım, hibrid tasarım, bir faktör tasarımı, pentagonal tasarım, hegzagonal tasarım, D-Optimal tasarım, kullanıcı tanımlı tasarım vb. şeklinde sıralanabilir. Bunlar arasında en çok kullanılan tasarım çeşidi merkez kompozit tasarımı olarak da bilinen MKT'dir (Montgomery, 2009, Lazic, 2004, Antony, 2003).

MKT, grafik oluşturmayı sağlayan, genişletilmiş merkez noktaları içeren deneysel tasarım metodudur. MKT'nin en büyük avantajı, küp noktalar olan ana tasarım noktalarının dışında da deneysel tasarıma olanak vermesidir. Ayrıca, bu noktaların varlığı, MKT ile tasarlanmış bir çalışmaya döndürülebilirlik kazandırmaktadır. Bu

model genellikle bir araştırmada matematiksel olarak doğrusal modellerin yetersiz kaldığı durumlarda ikinci dereceden model denklemlerinin açıklamasında ve tasarımında kullanılmaktadır. MKT'nin kullanılması halinde matematiksel model ikinci dereceden bir polinom formuna dönüşür. Genel anlamda yanıt değerleri doğrusal ve ikinci dereceden modeller tarafından seçilen faktörlere bağlı olarak hesaplanır (Montgomery, 2009, Lazic, 2004, Antony, 2003).

Ülkemizde, cevher hazırlama konularında yapılan çalışmalarında yanıt yüzeyi yöntemlerinin kullanıldığı araştırmaların sayısı oldukça sınırlı olup, son on yıl içerisinde deney tasarımı ve sonuçlarının optimize edilmesinde yanıt yüzeyi yöntemlerinin kullanılmasında artış gözlenmektedir. Ancak, birkaç araştırmacı haricinde (Aslan, 2007a, 2007b, Aslan ve Cebeci, 2007, Aslan ve diğ., 2008, Aslan ve Ünal, 2009, Özgen ve diğ., 2009, Oruç ve diğ., 2010, Celep ve diğ., 2011, Boylu, 2011), olması gereken düzeyde kullanımı gerçeğeleşmemiştir.

Oysaki yabancı literatürde yanıt yüzeyi yöntemleri yıllardan beri cevher hazırlamanın hemen hemen her konusunda kullanılmaktadır. Özellikle birçok parametrenin birlikte incelenmesinin tesis verimi ve işletme maliyetleri açısından önemli olduğu bu sektörde, deneysel tasarım kullanılarak kısa zamanda az deneyle çok bilgi elde etmek özellikle önemlidir.

Gravite ayırıcıları hakkında da dikkate değer miktarda yapılan çalışmada yanıt yüzeyi yöntemleri kullanılarak üretilmiş modellemeler vardır. (Wills ve Napier-Munn, 2006). Geliştirilmiş gravite ayırıcılarındaki ayırma mekanizmalarını anlamaya yönelik olarak McAlister (1992), Laplante ve diğ. (1994), Honaker (1995) ve daha birçok araştırmacı bu ayırıcılardaki ayırma mekanizmasını, bu ayırıcılar ile yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre geliştirdikleri bazı ampirik modeller ile tanımlamaya çalışmışlardır.

## **2.1 Oransal Santrifüj Kuvveti (G)**

Birçok cevher hazırlama metodu, aslında, katıların akışkan ortam içerisindeki hareketleri ile uğraşır. Yoğunluğu az akışkan ortamda askıda kalan tane yerçekimi kuvvetinin etkisi ile akışkan ortam içinde aşağı doğru bir doğrultuda yol alma eğilimindedir. Belirli bir ortam ve sabit dış koşullar altında bu çökmenin oranı tanelerin şekline olduğu kadar boyutlarına, özgül ağırlıklarına ve ortam sıvısının

yoğunluk ve viskozitesine bağlıdır. Çökmekte olan tane, akışkan ortamda yer çekimi kuvveti, akışkanın kaldırma kuvveti ve harekete zıt yönde direnç kuvvetinin etkisi altındadır. Direnç kuvveti taneyi hareket ettiren kuvvetlere eşit olduğu durumlarda çökme gerçekleşmez, asılı halde kalırlar. Ancak, katı-su sistemi (pülp), yerçekiminden daha güçlü bir kütleli kuvvet alanı içerisine konulabilirse, asılı tanecikler çökebilirler. Yerçekimsel alandan daha büyük bir kuvvet alanı kolaylıkla santrifüj ile yaratılabilir.

Santrifüj alanı içerisinde çökmenin temel teorisi Svedberg ve Pederson'un 1940'larda yaptıkları çalışmadan sonra birçok çalışmaya konu olmuştur.

Sürekli denklemler ve hareketin denklemlerinden oluşan temel denklemler santrifüjdeki taşınım olaylarını tanımlamak için geliştirilmiştir. Hsu yayınladığı bir yayında temel santrifüj denklemlerini türetmiştir (Majumder ve Barnwal, 2006).

Teorik olarak, santrifüj kuvvet alanı içerisindeki uygun akışı tarif eden süreklilik denklemleri ve pülp içerisindeki katının sabit dönel alan içerisindeki hareketin denklemleri, uygun sınır koşullar altında, tüm santrifüj hadisesini tamamen tanımlaması gerekir. Ancak, pratikte, eş zamanlı olarak birleştirilmiş bu kısmi diferansiyel denklemlerin çözümleri, kararlı hallerde bile, kolaylıkla elde edilemeyebilir. Bu yüzden bir çok çalışma sonuçları, santrifüj olayını açıklayan analitik prosedürlere dahil etmenin yolunu bulmak için deneysel korelasyonlara güvenmeye mecbur kalmıştır (Majumder ve Barnwal, 2006, 2008).

Santrifüj alanları iki farklı yolla, hidrosiklonlardaki gibi silindirik veya konik bir cihaza yüksek teğetsel hızla bir akışkan verilmesi ile veya bir kısmı ya da tamamı dönen cihaz ile üretilebilir. Burada akışkan, dönen bir hazne içerisine beslenir ve süratle ivmelenir. Akışkan içerisindeki fraksiyonel sürüklenme, haznedeki akışkan tabakaları arasında çok küçük bir dönel kayma veya bağıl harekete sebebiyet vereceğinden akışkanın tamamı sabit  $\omega$  açısal hızı ile dönmeye eğilimlidir.

Hazne içerisinde,  $m$  kütleli,  $\omega$  açısal hızıyla  $r$  yarıçaplı dönüş yapmakta olan bir taneye etki eden santrifüj kuvveti  $F_c = m\omega^2 r$  şeklinde olup radyal doğrultuda, gravitasyon kuvveti ise  $F_g = mg$  şeklinde olup dik doğrultudadır. Santrifüj kuvvetinin gravitasyonel kuvvete oranı  $G$  olarak bilinir ve

$$G = \frac{F_c}{F_g} = \frac{mr\omega^2}{mg} = \frac{r\omega^2}{g} \quad (2.1)$$

biçimindedir (2.1).

G sayısı yerçekimi alanından kaynaklı ayırmanın bir ölçüsüdür. Bu değer, bazı endüstriyel santrifüj cihazlarında çok büyük ( $\sim 10^4$ ) hatta ultra santrifüj cihazlarında çok daha büyük iken cevher hazırlama uygulamalarında 1500 kadardır (Coulson and Richardson, 1990).

### 2.1.1 Tanelerin santrifüj alan içerisindeki davranışları

Uygulamaların çoğunda, bir tane bir santrifüj alanında hareket ettiğinde, gravitasyonel etkiler küçük ve ihmal edilebilir olurlar. Santrifüj alanındaki parçacığın hareket denklemi,  $g$  yerçekimi ivmesinin  $r\omega^2$  santrifüj ivmesiyle yer değiştirmesi ile gravitasyonel alandaki parçacığın hareket denklemine benzer olacaktır (2.2).

$$F_c = \frac{\pi}{6} d^3 (\delta - \rho) r\omega^2 \quad (2.2)$$

Burada  $F_c$  santrifüj kuvvet,  $d$  tane boyutu,  $\delta$  parçacığın özgül ağırlığı ve  $\rho$  akışkanın özgül ağırlığıdır (Coulson and Richardson, 1990).

Bir süspansiyondan ince boyutlu tanelerin ayrılmasında kullanılan santrifüj için, tane ve sıvı arasındaki sürüklenmenin hesaplanmasında sadece Stoke Yasası'nı kullanmak ve diğer etkenleri ihmal etmek mümkündür. Fakat mineral endüstrisinde, santrifüjler yüksek yoğunluklu katı-sıvı karışımlarını işlemek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, mineral taneleri sadece santrifüj ve sürüklenme (drag) kuvvetine değil, ayrıca yüzdürücülük (buoyancy) ve parçacık çarpışma momentum kuvvetlerine de maruz kalırlar (Xiao, 1998). Geliştirilmiş gravite ayırıcısındaki bir parçacığın hareketi radyal, teğet ve eksensel bileşenlerine ayrıştırılabilir. (Ling ve Laplante, 1997) Bu sebepten, bu şartlar altındaki bir parçacığın hareketi oldukça karmaşıktır. Basitleştirmek için santrifüj ve sürüklenme (drag) kuvvetlerini ihmal ederek aşağıdaki Stoke yasasına dayanan denklemleri yazılabilir. Tane üzerindeki  $F_d$  sürüklenme (drag) kuvveti denklemi aşağıdaki gibi olur (2.3).

$$F_d = 3\pi\mu du \quad (2.3)$$

Burada  $F_d$  iç sürüklenme (drag) kuvveti,  $\mu$  akışkanın viskozitesi,  $u$  akışkana göre parçacığın hızıdır. Santrifüj ivmesi parçacığın konumunun bir fonksiyonu olduğundan, akışkandaki küresel bir tane için Stoke yasası tane hareket denklemi (2.4);

$$F_c - F_d = \left[ \frac{\pi}{6} d^3 (\delta - \rho) r \omega^2 \right] - \left[ 3\pi\mu d \left( \frac{dr}{dt} \right) \right] = \frac{\pi}{6} d^3 \delta \left( \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $t$  parçacığın hareketi için geçen süredir. Tane hareket ettikçe, ivmeli kuvvet artarken tane akışkan içerisinde asla sabit bir hıza sahip olamaz. Denklem (2.4)'teki hareket denkleminin sağ tarafındaki atalet terimleri ihmal edilirse,

$$\frac{dr}{dt} = \frac{d^2 (\delta - \rho) r \omega^2}{18\mu} = u_0 \frac{r \omega^2}{g} \quad (2.5)$$

elde edilir. Görülen odur ki anlık hız ( $dr/dt$ ) gravitasyonel alandaki terminal hız  $u_0$ 'ın  $r\omega^2/g$  şeklinde bir faktör ile çarpımına eşittir. Santrifüje maruz kalan pülp, başlangıçta pülp yüzeyinde olan bir tanenin hazne duvarına ulaşması için geçen süre yukarıdaki denklemin (2.5) entegrali ile elde edilir (2.6).

$$t = \frac{18\mu}{d^2 \omega^2 (\delta - \rho)} \ln \left( \frac{R}{r_0} \right) \quad (2.6)$$

Buradaki  $R$  kabın yarıçapı ve  $r_0$  pülp yüzeyinin yarıçapıdır. Denklem (2.5) ve (2.6) gösteriyor ki bir parçacığın çökmesi için yüksek santrifüj ivmesi ve düşük zaman yeterlidir. Bu nedenle santrifüj alanda ayırma yüksek oranda sağlanır (Coulson and Richardson, 1990).

Buradaki son iki denklem (2.5 ve 2.6), sadece parçacığın çökme hızı, zaman ve dönüş hızı arasındaki ilişkiyi basitleştirmek için yazılmıştır. Uygulamada santrifüj kuvvet, ayırma işlemini ivmelendirebilir, ancak ayırma mekanizması sadece  $d$ ,  $\delta$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  ve  $\omega$  ya bağlı olacak kadar basit değildir. Örneğin bu son iki denkleme dayanarak, 83 mikrondan büyük bütün silis taneleri için çökme, boyutu 25 mikrona

eşit ya da daha küçük ve özgül ağırlıkları saf altınla neredeyse aynı olan tungsten tanelerinden daha hızlı olur ve daha az zaman alır. Bu olgu bir çok santrifüjlü ayırıcı için, özellikle 600 mikron civarındaki iri silika varlığındaki 25 mikronun altı dahil, her boyut aralığındaki altını ayırabileceğini iddia eden Knelson ve Falcon Superbowl için doğru değildir. Bu nedenle santrifüjlü ayırıcıların ince boyutlu altını zenginleştirme kabiliyetleri tane-tane çarpışması, süzülme (percolation) veya aradan dökülme (consolidation trickling) gibi başka mekanizmalardan kaynaklanmaktadır (Xiao, 1998).

Santrifüj film tabakasında askıda kalan kritik tane boyutu denklemi (2.7)'de verilmiştir.

$$d_{cr} = k_0 \sqrt[4]{\frac{g}{\omega^2 r}} \quad (2.7)$$

Burada,  $d_{cr}$  kritik tane boyutu,  $k_0$  operasyon parametreleri ile ilgili oransal sabitidir. Buradan çıkan anlam, kazanılacak tanelerin boyutu dönme hızı, dolayısıyla uygulanan santrifüj kuvvetin şiddeti arttıkça küçülecektir (Xiao, 1998).

### 2.1.2 Santrifüj ile çökmenin matematiksel tanımı

Sıkıştırılmayan bir akış içerisinde küresel tanenin santrifüj alan içerisindeki çökmesine ait hareket denklemi (2.8) yazılırsa;

$$\frac{dv}{dt} + \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} v = \frac{\omega^2 r}{\rho_p} [\rho_p - \rho_f] \quad (2.8)$$

Çok küçük bir tanenin Stokes bölgesindeki ( $10^{-4} < Re < 0.4$ ) çökmesinin son hızı, Denklem (2.8)'da ivmeyi "0" olarak belirlendiğinde şu şekilde yazılabilir (2.9).

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f) D_p^2 \omega^2 r}{18\mu} \quad (2.9)$$

Reynolds katsayısı,  $Re = D_p \rho_p v / \mu$  olarak tanımlanır.

Denklem (2.2)'deki terimler Denklem (2.9)'da yerlerine koyulursa;

$$v = G v_g \quad (2.10)$$

$V_g$  taneciğin yerçekimi kuvveti altındaki çökme hızıdır.

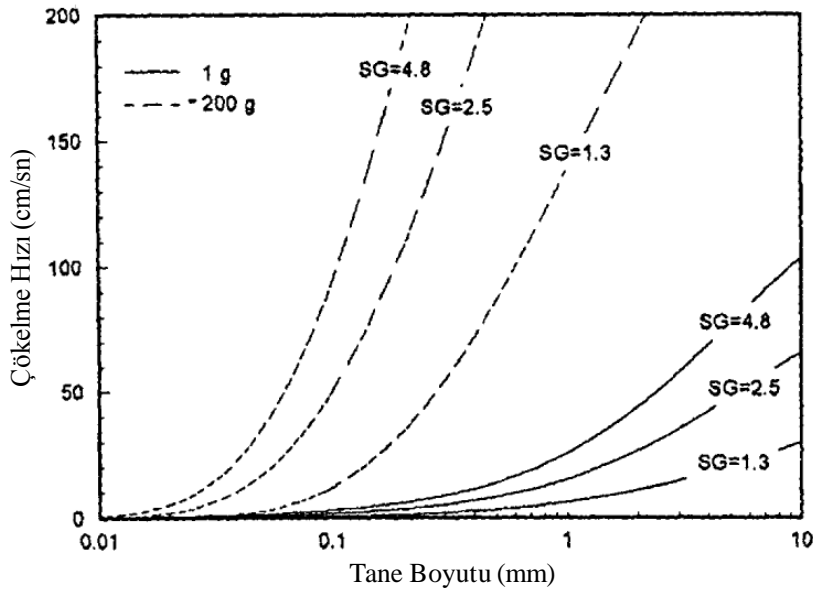
Yukarıdaki saptama, çöken taneciğin Reynolds katsayısı Stokes bölgesinden ayrılırsa doğruluğunu yitirir. Bu problem için, bir akışkan içerisinde hareket eden taneciğin mekanik uygulamaları analiz edilmiştir. Detaylı analizler sonucunda, Hsu (1981), santrifüj ve gravite kuvveti altında terminal hızı şu şekilde önermiştir;

$$v = G^{1/2} v_g \quad 0,4 < Re < 500 \quad (2.11)$$

$$v = G^{1/3} v_g \quad 500 < Re < 2 \cdot 10^5 \quad (2.12)$$

(2.10)-(2.12) nolu denklemlerinin karşılaştırılması sonucu, santrifüj etkisinin, tane boyutu küçüldükçe çökme hızı üzerinde daha etkin olduğu açıkça görülmektedir (Majumder ve Barnwal, 2006).

Şekil 2.1’de özgül ağırlıkları sırası ile 1,3, 2,5 ve 4,8 olan küresel kömür, şeyl ve pirit tanelerinin normal gravite alanı (1G) ve suni gravite alanı (200G) altındaki teorik çökme hızları görülmektedir. Takip eden örnek bu görüşü açıkça desteklemektedir.



**Şekil 2.1** : Santrifüj kuvvetin çökme hızına etkisi (Luttrell ve diğ., 1995).

Santrifüj hakkındaki basılı literatürlerin çoğunda, akışkan kuvvetlerin karşı etkisi altında ve izole haldeki tek bir taneciğin sıvı içerisindeki çökme davranışı incelenmiştir.

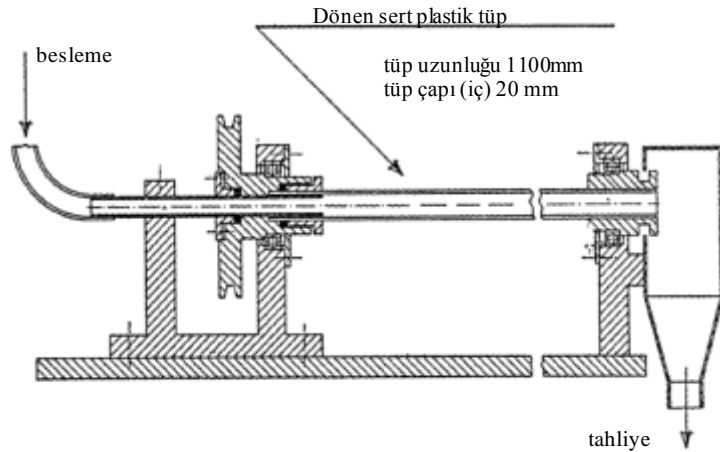


## 2.2 Geliştirilmiş Gravite Ayırıcıları

Yüzyıldan uzun zamandır, değerli metalleri ekonomik olarak kazanan geliştirilmiş gravite kullanan cihazların üretimi, ekipman geliştiren birçok kişi ve kuruluş için ana amaç olmuştur ve 60 yıldan uzun zamandır da cevher hazırlama endüstrisinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Abela, 1997).

Bilinen ilk santrifüjlü gravite ayırıcısının patenti 1891 yılında Peck tarafından alınmıştır. Her ne kadar, batıda 40 yıl öncesine kadar bu teknoloji diğerlerine nazaran daha az bilinmekteyse de, santrifüjlü ayırıcılar 1950'lerde Sovyetler Birliği'nde geliştirilmiş, aynı zamanda da 1960'lardan beri Çin'de kullanılmaktadır.

Santrifüj ayırma hakkında yapılan ilk bilimsel çalışma 1960'larda Ferrara tarafından yapılmıştır. Daha sonradan Ferrara tüpü (Şekil 2.2) adını alacak bu ilkel cihaz 20 mm çaplı 1100 mm uzunluğunda 2200 rpm ile dönen sert plastikten yapılmıştır. Cesaret verici sonuçlara rağmen tasarımın doğasında bulunan mekanik zorluklar ticari uygulamasını imkânsız kılmıştır. (Burt ve diğ., 1995)

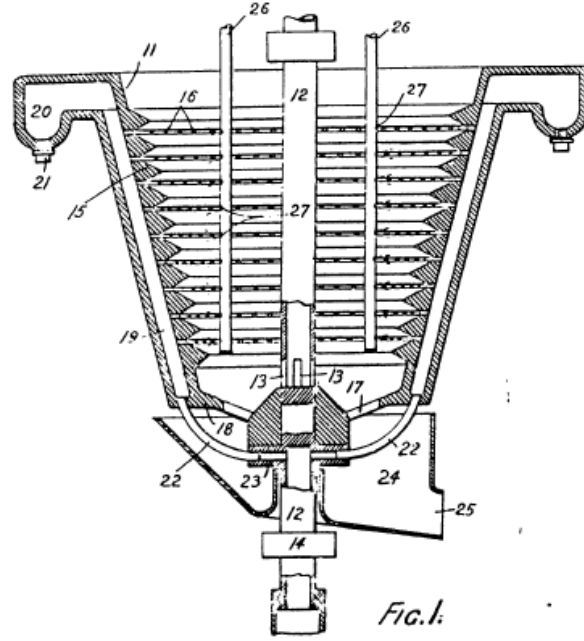


**Şekil 2.2 :** Ferrara tüpünün şematik gösterimi (Majumder ve Barnwal, 2006).

Akışkanlaştırma yatağı olan geliştirilmiş gravite ayırıcılarının ilki sayılabilecek bir cihazın patenti de 1935 yılında MacNicon tarafından Avustralya'da alınmıştır (Avusturya patent no: 22,055/35, onay: 2 Nisan 1935). Bu cihazda hazne duvarının tümünde akışkanlaştırma yapılmaktadır (Şekil 2.3). Birçok üretici MacNicol'un öncülük ettiği bu çalışmadan esinlenmiştir.

Ancak, bu cihazların varlığına rağmen, ticari açıdan başarılı uygulamalar yakın zamanda, sadece 20-25 yıl önce ortaya çıkmıştır (Url-1). Geçtiğimiz on yıllarda da, santrifüjlü ayırıcıların kullanımı dünya genelinde tekrar artış göstermiştir. Bu

yenilenen ilgi, bir yandan düşük maliyeti, işletmesinin basit olması ve yüksek kazanma veriminin (Burt, 1999, Richards ve Palmer, 1997), diğer yandan da giderek artan çok sıkı çevre koruma koşullarının (Ergün ve Ersayın, 2002a) sonucudur.



**Şekil 2.3 :** Akışkanlaştırma yatağı olan geliştirilmiş gravite ayırıcısı (McAlister ve Armstrong, 1998).

Modern, geliştirilmiş gravite ayırıcılarının mineral endüstrisine girişi çok ince boyutlu taneciklerin geliştirilmiş gravite yöntemleri ile zenginleştirilmesi ve artıkların geri kazanımı ile olmuştur. Çok ince boyutlu taneciklerin ayrılmasına yönelik olarak santrifüj kuvvetinden yararlanan bir çok cihaz tasarlanmıştır.

Siklon tipi ayırıcılarda santrifüj kuvvet genellikle teğetsel besleme giriş mekanizması ile sağlanırken, santrifüjlü ayırıcılarda ayırıcı hücrenin kendisinin dönmesi ile üretilir. Santrifüjlü gravite ayırıcıları üç basit tipte ele alınabilir: dikey eksenli makineler ve türleri (Knelson, Falcon, vb), santrifüjlü jigler ve yatay eksenli makineler (MGS, SLS vb) (Burt ve diğ., 1995, Ling, 1998).

Dikey eksenli cihazlar, esas olarak plaser tip yataklardan ince altın cevherlerini kazanmak için geliştirilmiştir (Burt ve diğ., 1995).

Santrifüjlü jiglerden piyasada satıldığı bilinen tek örnek ise Kelsey jigidir. Standart bir jig olup, bir silindire sarılmış ve dikey eksen üzerinde döndürülmektedir. İlk başarılı ticari kurulumu Avustralya'da Renison'daki kalay madenindedir (Burt ve diğ., 1995, Wills ve Napier-Munn, 2006).

Yatay eksenli cihazların kullanımı özellikle Çin'de yaygın olup, sadece altında değil, demir, kalay ve tungsten cevherlerinde de kullanılmıştır. Cihaz aslında, 400-700 devir/dakika ile dönen konik bir silindirden oluşmuştur (Burt ve diğ., 1995). Ancak en bilineni, sarsıntılı masa yüzeyinin bir tambur haline dönüştürülmüş hali denilebilecek MGS'dir.

Sürekli çalışan ve ticari olarak da kullanılan geliştirilmiş gravite ayırıcıları Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), Kelsey Jigi, Knelson ve Falcon ayırıcılarıdır. Bu cihazlardan özellikle Knelson ve Falcon ayırıcıları 38 mikron, hatta daha küçük boyutlu tanelerin zenginleşmesini sağladıklarından özellikle altın zenginleştirmede oldukça başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar (Ancia ve diğ., 1997, Knelson, 1988, 1992, Knelson ve Jones, 1993, Laplante, 1993, 1995, Xiao, 1998, McLeavy ve diğ., 2001, Ren ve diğ., 1994, Ling, 1998, Wills ve Napier-Munn, 2006).

Geliştirilen yeni geliştirilmiş gravite ayırıcılarından Mozley Multi Gravite Ayırıcısı (MGS), 10 mikron altındaki kasiderit ( $\text{SnO}_2$ ) cevherlerini, Knelson ve Falcon Superbowl ayırıcıları ise 25 mikrondan küçük boyutlar dahil altın cevherini zenginleştirmiştir. Yapılan araştırmalara göre, laboratuvar tipi Falcon L40 değişik beslemelerde 8 ile 25  $\mu\text{m}$  arasındaki tungsten cevherlerinin %90'ını kazanabilmektedir (Majumder ve Barnwal, 2006).

Yapılan araştırmalar sonucu MGS, Kelsey Jigi (Riley ve diğ., 1995) ve Knelson (Paul ve Honaker, 1994) ayırıcısında yüksek verimler ile kül ve piritin kömürden uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Ancak her bir çalışmada yoğunluk kesme noktasının 1,9-2,1 gibi yüksek bir değerde kaldığı ve kapasitenin düşük olduğu belirtilmiştir. Büyük olasılıkla bunun sebebi sağlanan santrifüj kuvvetinin sadece doğal santrifüj kuvvetinin 60 katından büyük olmamasıdır. Diğer yandan, Falcon ayırıcısı 300 G'ye kadar olan bir santrifüj kuvveti uygulama kabiliyetine sahiptir. Bu sayede düşük yoğunlukta kesme noktasına ve yüksek kapasiteye imkan vermektedir (Honaker ve diğ., 1996).

Bu ayırıcılardan başka, ince ve çok ince tanelerin ayrılması için kullanılan ve sürekli olarak çalışabilen SL-tipi Ayırıcı (SLS) 330-660 G aralığında 2 mikrona kadar ayırma yapabilmektedir (Xiao, 1998, Ren ve diğ., 1994).

Ayrıca, Çin'de SLon devamlı çalışan santrifüjlü ayırıcısı, manyetik ayırma ürünü olan hematit konsantresinin temizlenmesi için özel olarak üretilmiştir ve yapılan

çalışmalarda oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. %62,32 Fe içeren hematit konsantresi SLon ayırıcısı ile % 65,02 Fe içeriğine çıkarılmıştır (Chen ve diğ., 2008).

Geliştirilmiş gravite ayırıcılarının bir diğer kullanım alanları da, hem altın tesislerinde hem de kıymetli metal kazanan proseslerde primer öğütmenin santrifüjlü ayırıcılara beslenmesi ile serbest altının ve kıymetli metallerin kazanılmaya çalışılmasında, sarsıntılı masa artıklarının değerlendirilmesinde, liç beslemesinin ön konsantrasyonunda ve klasik ve flaş flotasyon ile zenginleştirme devrelerinde başarılı olarak kullanılmaktadır (Ur1-1).

Laplante ve diğ. (1994) geliştirilmiş gravite ayırıcılarının kullanımının avantajlarından birinin de liç ve flotasyon reaktif maliyetlerinin azaltılması ile sağlanan kazanç olduğunu belirtmiştir.

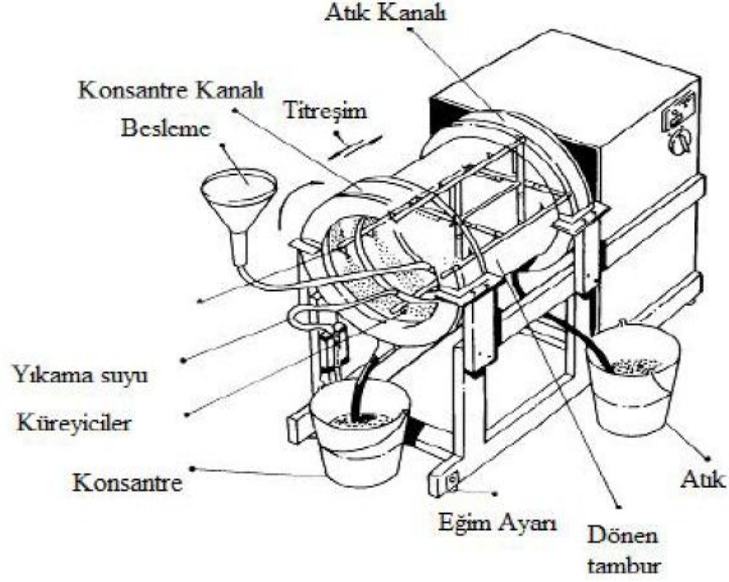
Ayrıca, birçok araştırmacı tarafından yapılan araştırmalarda, mikst karakterli kömür tanelerinin gravite temelli ayırıcılar ile zenginleştirilmesinin köpük flotasyonuna göre daha verimli olduğu rapor edilmiştir (Hanoker ve diğ., 2004, Honaker ve diğ., 2000, Demir ve diğ., 1999, Honaker, 1998, Venkatraman ve diğ., 1995, Abdel-Khalekh, 2000)

Ancak, yakın zamana kadar, yüksek kapasiteli gravite yöntemi ile zenginleştirme yapan sistemler 100 mikrondan daha küçük tanelerin zenginleştirilmesi için verimli değildi. Geçtiğimiz on yıllarda, normalde köpük flotasyonu prosesleri ile zenginleştirilebilen taneleri verimli olarak işleyen birçok geliştirilmiş gravite ayırıcısı sisteme alınmıştır. Hatta, yakın geçmişte, kömürdeki kükürt uzaklaştırma oranını artırmak için bir geliştirilmiş gravite ayırıcısı içeren köpük flotasyonu devresi patenti alınmıştır (Venkatraman ve diğ., 1995).

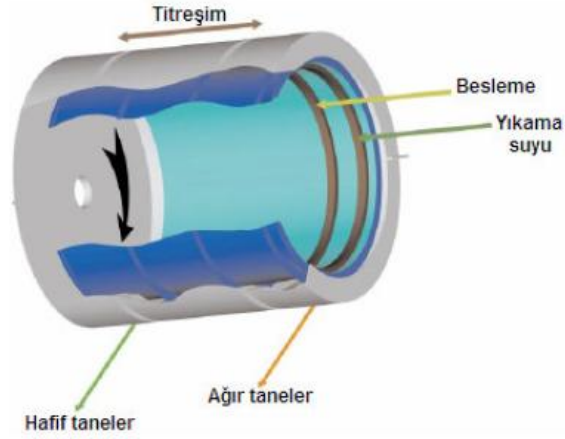
### **2.2.1 Mozley multi gravite ayırıcısı (MGS)**

Mozley Multi Gravite ayırıcısı (MGS), yakın zamanda, İngiliz Teknoloji Grubu desteğinde Richart Mozley tarafından ince ve çok ince boyutlu minerallerin ayrılması amacıyla geliştirilen ve endüstriyel ölçekte kullanılan geliştirilmiş gravite ayırıcılarından biridir. MGS'de, merkezkaç kuvvetinden doğan ivme ile klasik sarsıntılı masada geçerli olan kuvvetlerin birleşik etkisini kullanarak ayırma yapan bir zenginleştirme cihazıdır. MGS, sarsıntılı masa yüzeyinin bir tambur şekline dönüştürülerek kullanılması prensibi ile tanımlanabilir (Şekil 2.4).

MGS ünitesinin ana parçasını bir tarafı açık, diğer tarafı kapalı olan bir silindir oluşturur (Şekil 2.5). Tambur hareketini sağlayan eksantrik şaft tarafından tahrik edilen, tamburla aynı yönde fakat tambura göre biraz daha hızlı dönen ve üzerinde küreyiciler bulunan bir ünite vardır. Çalışma sırasında küreyiciler katı taneleri tamburun dar, açık dış ağzına doğru hareket ettirecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.4 : MGS ayırıcısının şematik görünüşü (Traore ve diğ., 1995).



Şekil 2.5 : MGS'nin şematik görünümü (Url-2).

Mineral tanelerinin zenginleştirilmesi tambur iç yüzeyinde gerçekleşir. Uygun katı oranındaki (%10-50) pülp, belirli bir basınçla hareketli tamburun orta noktasından iç yüzeye beslenir (Şekil 2.5). Bir anlamda besleme sırasında oluşacak türbülans etkisi azaltılmaktadır. Tambura malzeme akış yönünde, geleneksel Wilfley sarsıntılı masalarındaki harekete benzer ileri-geri hareket verilir. Tambur hareketinin genlik ve titreşim frekansı, zenginleştirilecek malzemenin boyutuna göre ayarlanır. Genellikle,

iri besleme için yüksek genlik gerekirken, ince besleme için yüksek frekans daha iyi bir ayırma sağlar. Titreşim frekansı 4-6 cm/s arasında değişirken genlik 12,7-19,0 mm arasında değişir. Tambur 160-240 devir/dakika hızı ile dönerek taneler üzerine yerçekimi kuvvetinin 8-22 katı kadar bir kuvvet uygular (Cordingley, 1997, Chan ve diğ., 1991a, 199b). Yüzey üzerinde oluşan tabaka halinde akan akışkan ortamdaki zenginleştirme için tambur yatayla 3-5<sup>0</sup>'lik bir açı yapacak şekilde konumlandırılır. Tamburun belirli bir hızla dönmesi sonucu oluşan merkezkaç kuvvetinin de etkisiyle taneler pülp içinde engelli çöküş ortamı oluştururlar. Özgül ağırlığı yüksek taneler akışkan tabaka içinde çökerek tambur yüzeyine tutunmakta ve merkezkaç kuvvetinin etkisi ile yarı katı bir tabaka oluşturmaktadır. Çöken ağır tanelerden oluşan bu yatak özel tasarlanmış küreyiciler yardımıyla hafif eğimli tamburun yukarısına doğru taşınarak besleme ucunda konumlanmış konsantre oluşuna sıyrılırlar. Hafif tanelerin ağır tanelerden etkili bir şekilde ayrılması, ağır malzemelerin alındığı yere yakın bir yerden tabaka üzerine verilen yıkama suyu sayesinde meydana gelir. Yıkanan hafif malzeme sürekli olarak besleme ucunun aksi yönünde konumlanmış atık oluşuna doğru hareket eder ve yıkama suyu ile birlikte hareket ederek alt çıkıştan alınır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

MGS'lere 0,3 mm'den daha ufak cevherler beslenebilmektedir, 0,1 mm'den daha ufak tanelerde de etkin ayırma yapabilmektedir. Pilot ölçekteki ayırıcının (Şekil 2.6) tambur çapı 0,5 m ve boyu 0,6 m iken, endüstriyel boyuttaki tamburların boyu 0,9 m, çapı 1,2 m'dir (Şekil 2.7). MGS'lerin kapasiteleri çaplarıyla orantılıdır. Endüstriyel boyuttaki ve iki tamburlu ünitelerde 4 ton/saat kapasiteye ulaşılabilir.

MGS'lerin endüstride kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kullanıldığı yerler arasında artıkların ve ekonomik olarak kazanımı olanaklı olmayan kalay, krom, tungsten ve nadir metalleri içeren şamların gravite yöntemi ile kazanımına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, barit, anatas ve demir cevherlerinin, sahil kumlarındaki ağır minerallerin, kömür ve benzeri endüstriyel minerallerin zenginleştirilmesini olanaklı kılmaktadır (Kangal ve Güney, 2001, Gence, 2001, Ateşok ve diğ., 2003, Özer ve diğ., 2003, Çiçek ve diğ., 2000).

Ağır ve hafif minerallerin birbirinden ayrılmasında kullanılan MGS ünitesinde verimli bir ayırma koşulunun sağlanabilmesi için mineral yoğunlukları arasında en az 1,0 birim özgül ağırlık farkının olması gerekir. Efektif ayırma boyutu 1-300 mikron

arasında olmasına karşın daha iri boyutlarda da başarılı olarak ayırma yapılabilmektedir.



Şekil 2.6 : Pilot ölçekli MGS cihazı.



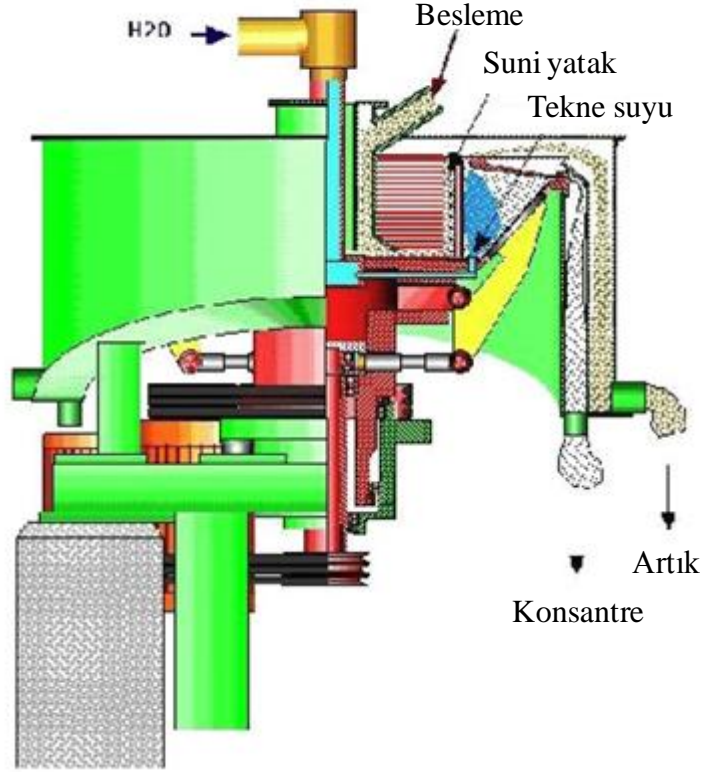
Şekil 2.7 : Endüstriyel ölçekli MGS cihazı.

MGS'nin geliştirilmesi sırasında, kalay, tungsten, tantalum, krom ve selestit gibi ağır minerallerin MGS ile zenginleştirilmesinin incelendiği birçok araştırma yapılmış, çok ince boyutlarda MGS'nin klasik yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Chan ve diğ., 1989, 1991a, 1991b, Tucker ve diğ., 1991, Clemente ve diğ., 1993, Traore ve diğ., 1995, Burt ve diğ., 1995, Bhaskar ve diğ., 2002).

### 2.2.2 Kelsey jigi

Kelsey jigi, klasik jiglerde kullanılan tüm parametrelerden yaralanan, bunlara ilaveten santrifüj kuvvetini de kullanan yeni bir cihazdır. Kelsey Jigi için, santrifüj alanına dik yerleştirilmiş bir Harz jigi denebilir (Malvick ve diğ., 1997).

Döner bir hazne etrafına sarılmış seri teknelerden oluşmaktadır. Tekneler, darbe suyunu (pulse water) tutar ve çıkış musluğundan konsantreyi boşaltır. Bu haznenin içinde suni bir yatak (ragging bed) oluşturmak için bir üçgen profilli bir elek vardır. Bu santrifüj jiginin şeması Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

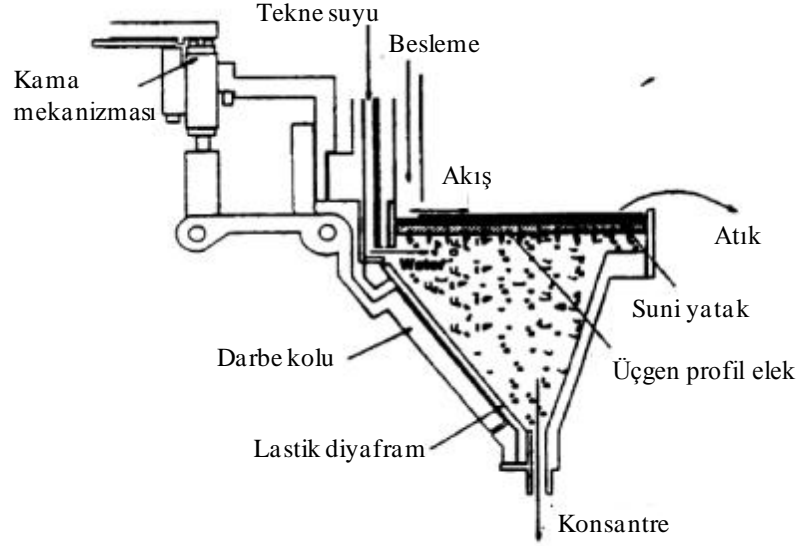


Şekil 2.8 : Kelsey jigi şematik görünümü (Url-3).

Her tekneye mekanik pulsatörler yerleştirilerek yatakta farklı yoğunluktaki malzemelerin ayrımı için pulsasyonlar yaratılmaktadır. Darbeyi veren diyafram, pulsasyonu veren ana tahrik mekanizmasından bağımsız olarak monte edilmiş eksantrik motor ile kontrol edilir. Birbirinden ayrılmaya meyilli ağır ve hafif minerallerin yoğunlukları arasındaki bir yoğunluğa sahip suni yatak malzemesi eleğin üzerine yerleştirilmiştir. Besleme, jig birimine merkezi besleme borusundan, üst kısımdan girer ve haznenin dönüşü ile oluşan maksimum 60 G'lik santrifüj kuvvet (Malvik ve diğ., 1997, Ling, 1998), pülpü suni yatağa temas etmeye zorlar. Darbe kollarının yüksek frekanslı ve sıralı basması (stroke), suni yatak boyunca klasik jiglerdeki gibi basma hareketi yaratır ve bu sayede suni yatağın genişleyip daralmasına sebep olur. Bu, sırası ile beslemenin ve suni yatak parçacıklarının özgül ağırlıklarına bağlı olarak farklı ivmelenmesine yol açar. Ağır yoğunluğa sahip taneler suni yatak içinden geçerek çıkış musluğundan konsantre bölmesine boşalırken düşük



yoğunluktaki taneler suni yatağın üzerinden akar ve ünitenin üzerinden taşarlar (Yerriswamy ve diğ., 2003). Kelsey jiginin tekne mekanizması Şekil 2.9'da görülmektedir.



**Şekil 2.9 :** Kelsey Jigi tekne mekanizması (Xiao, 1998).

Özellikle yatırım ve işletme maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, suni yatak malzemesinin geri kazanımı ve beslemenin hazırlığındaki fazladan eleme ve malzemelerin yığılması bu cihazın olumsuzlukları arasında bulunmaktadır (Malvik ve diğ., 1997). Ancak Kelsey Jigi diğer geleneksel jiglerin ayıramayacağı kadar küçük tanecikleri geri kazanabilir. Ticari olarak en büyük başarısı, spiral ve sarsıntılı masa devreleri için çok küçük boyutlu (~10 mikron) olan Renison kalaylarından kasideritin geri kazanımıdır. Sahil kumu tesislerinde zirkonyum ve kyanite minerallerini ayırmaya yönelik uygulamaları vardır (Majumder ve Barnwal, 2006).

Kelsey jigii şimdiye kadar kalay, sahil kumları, demir cevheri, altın, kurşun, manganez ve platin cevherlerinin zenginleştirilmesinde başarıyla uygulanmıştır.

Metalik cevherlerin zenginleştirilmesinde ve endüstriyel çamurlar ve atıklardaki ağır minerallerin kazanımında başarı ile kullanılabilir. Henüz kömür için araştırma aşamasında olan Kelsey jigii özellikle ince taneli piritin kömürden uzaklaştırılması amacıyla yönelik olarak geliştirilmektedir.

Bu jigler ile 150 mikronun altındaki taneler bile etkili bir şekilde zenginleştirilebilir. Laboratuvar ölçeğinde kullanılan 15-100 kg/saat nominal kapasiteye sahip Kelsey jiglerinin endüstriyel boyuttaki kapasiteleri 5-60 ton/saat'e kadar çıkabilmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Endüstriyel Kelsey jigleri (Url-3).

### 2.2.3 Knelson ayırıcısı

Byron Knelson tarafından Kanada’da patenti alınmış olan Knelson ayırıcısı, cevher hazırlama endüstrisine, ilk olarak 1978 yılında, kesikli çalışan bir makine olarak tanıtılmıştır. Neredeyse 30 yıl süren geliştirme ve modifikasyon sonucu farklı amaçlar için farklı Knelson ayırıcıları üretilmiştir ve günümüzde dünyanın her yerinde kıymetli metal endüstrisinde kullanılmaktadır (Knelson, 1988, 1992, Knelson ve Edwards, 1990, Knelson ve Jones, 1993, 1994, Majumder ve diğ., 2007a, Url-4).

Kesikli çalışan Knelson ayırıcısı, sürekli boşaltan makinelerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. (Majumder ve Barnwal, 2006, 2008, McLeavy ve diğ., 2001, Knelson ve Jones, 1994, Knelson, 1992)

Knelson ayırıcıları manuel boşaltmalı, ortadan boşaltmalı ve değişken boşaltmalı olarak sınıflandırılabilirler. Ayrıca, kesikli ve sürekli çalışan olmak üzere 2 değişik tipte Knelson ayırıcıları vardır. Sürekli çalışan Knelson ayırıcısı (CVD) değişken boşaltmalı olup özellikle baz metaller ve kömür endüstrisi için geliştirilmiştir. Kesikli çalışan Knelson ayırıcıları ise 3 değişik modelde imal edilmektedir. Manuel (MD) modeller, genellikle, laboratuvar ve pilot çağı olarak kullanılır. Merkezi boşaltmalı (CD) modeller, değerli metallerin kazanımında dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modellerde boşaltma işlemi 2 dakikadan az bir sürede gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda geliştirilen “Extended Duty” (XD) modeli ise ortadan boşaltmalı tipte çalışan ve özellikle sert kayaların öğütme devrelerinden değerli metal kazanımı için kullanılmaktadır (Knelson ve Jones, 1994, Url-4).

3adet MD, 5 adet CD, 9 adet XD ve 6 adet CVD modeli olmak üzere toplam 23 değişik modelde Knelson ayırıcısı üretilmektedir (Url-4). İlk ünitenin sipariş

verildiği 1980 yılından bu yana yetmiş aşkın ülkede 1500'den fazla Knelson ayırıcısı sisteme alınmıştır (Majumder ve Barnwal, 2006, Url-4).

Knelson başlangıçta dünyada damar tipi ve plaser tipi yataklardan altın kazanımı için tasarlanmıştır. Jigler ve spiraller gibi gravite ile zenginleştirme yapan ayırıcılara göre daha ince altın taneleri kazanılabilmektedir (Zhang, 1998). Genellikle, çok ince zenginleştirme yerine altının öğünme ve sınıflanma davranışlarından dolayı birikme gösterdiği ayırma proseslerinde, altın öğütme devresi dahilinde ince serbest altının kazanılması için etkin bir şekilde kullanılır (Banisi 1990). Elde edilen konsantre genellikle sallantılı masaya gönderilirken, atıklar hidrosiklon beslemesine ya da siyanürleme işlemine gönderilmektedir (Knelson ve Jones, 1994).

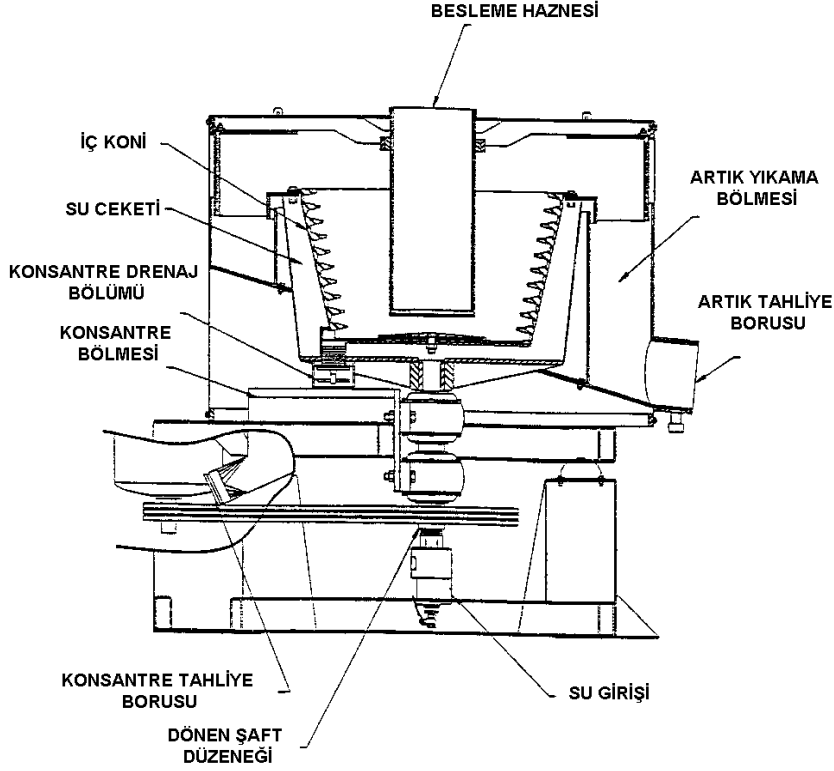
Knelson ayırıcısı, hem plaser tipi hem de primer şekilde oluşmuş altın yataklarındaki iri ve ince altını kazanabilme kabiliyetinden dolayı genellikle altın endüstrisinde kullanılmasına rağmen diğer cevherlerin zenginleştirilmesinde de kullanılmaktadır.

Ayrıca, Knelson ayırıcıları metalurjik atıklardan, nehir kumlarından ve farklı cevherlerden platin, kurşun, gümüş ve bakır gibi değerli metallerin kazanımı için endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Standart Knelson ayırıcısı, 6 mm ya da daha küçük üst tane boyutuyla çalışabilmektedir. Basit yapısı, yüksek kapasite, geniş tane boyutu aralığında çalışabilmesi ve çok yüksek zenginleştirme oranlarında ayırım yapabilmesi en büyük avantajlarını oluşturmaktadır. Diğer avantajı, şlam içeren malzemeyi de zenginleştirmesidir. Knelson ayırıcısının etkinliği gangın yoğunluğu ve besleme hızının etkisiyle değişmektedir. tane boyut dağılımının, gang yoğunluğunun düşük olması şartıyla, Knelson ayırıcısı ile zenginleştirme üzerine çok az etkisi olduğu belirlenmiştir (Knelson ve Jones, 1994).

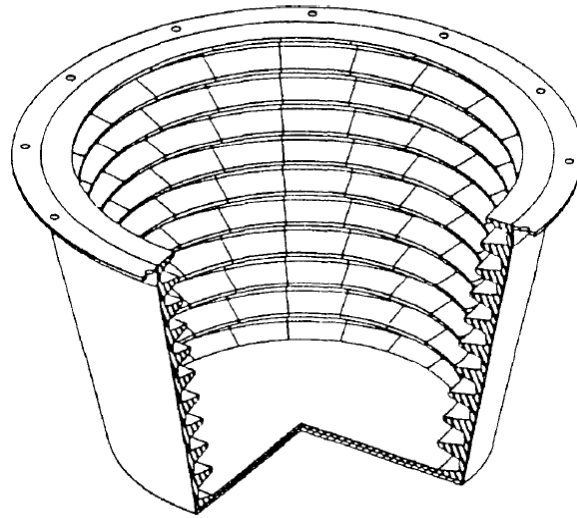
Knelson ayırıcısının en büyük dezavantajı, tane yatağını akışkan tutmak için besleme miktarının 2-3 katına varan, çok büyük miktarda su gereksiniminin olmasıdır (Luttrell ve diğ., 1995).

Knelson ayırıcısı, zenginleştirme görevini akışkan yatak kullanarak yerine getiren, kase tipli gelişmiş santrifüjlü gravite ayırıcısıdır. Standart tip Knelson ayırıcısının şematik görünümü Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11 :** Standart tip Knelson ayırıcısı (Knelson ve Jones, 1994).

Bütün Knelson ayırıcısı modellerinde esasen dönen bir silindirik üniteye vidalanmış “V” şeklinde birbirine paralel bir seri oluğa sahip tepesi kesik koni şekilli bir hazneden oluşur (Şekil 2.12).



**Şekil 2.12 :** Knelson ayırıcısı ayırma haznesi (Knelson ve Edwards, 1990).

Zenginleştirme işlemi, hazne denilen ortamda, santrifüj kuvvetinin etkisiyle haznenin çeperinde oluşan akışkan yatakta gerçekleşmektedir. Çoğunlukla siklon alt akımı veya bilyalı değirmen çıkışı olan beslenen malzeme, Knelson ayırıcısına merkezi

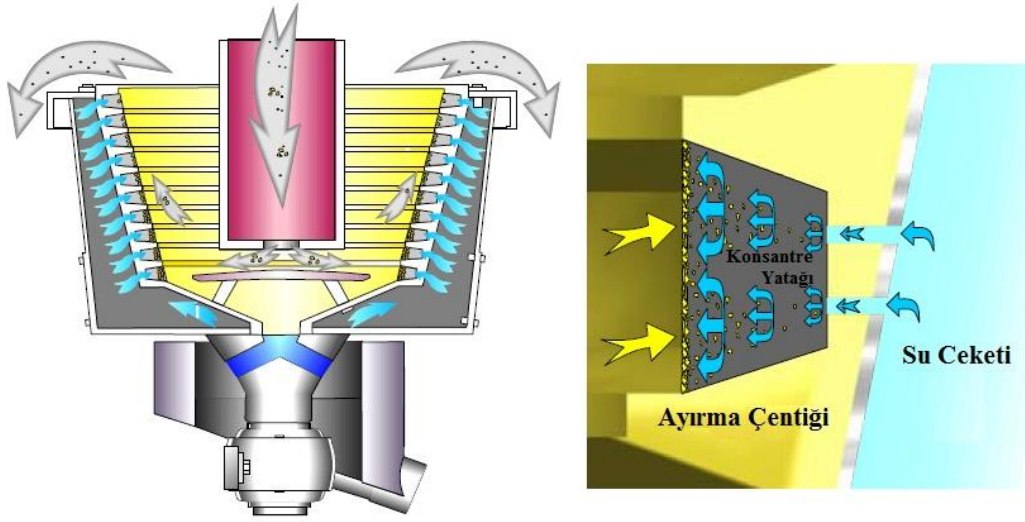
besleme borusundan pülp halinde beslenir. Besleme % 70 pülpde katı oranına kadar yapılabilir. Pülp dönen koni tabanına doğru alçalır. Ayırma haznesinin dibinde beslemeyi dağıtacak olan bir pervane mevcuttur (Knelson ve Jones, 1993). Pülp ilk olarak dışa doğru fırlatılır. Burada tanelerin üzerinde, dairesel yörüngelerini muhafaza etmelerini sağlayacak bir merkezci kuvvet yoktur. Bunun sonucu olarak bazı taneler haznenin ayırma çentikleri içinde konsantre yatağı formunda yakalanırken, artık artan su akışı ile birlikte artık akımı şeklinde yukarı doğru taşınır.

Santrifüj kuvvet, ilk beslemenin tabandaki ayırma çentiğini katı ile doldurmasına sebep olur ve oluşan moment nedeni ile çapı bir öncekinden çok az daha büyük olan bir üstteki ayırma çentiklerinin sırası ile dolmasını sağlar. Ayırma çentikleri katı ile dolar dolmaz gelen besleme dolmuş ayırma çentiklerinin konik yüzeyinde ince bir tabaka halinde yukarı doğru hareket eder ve ağır minerallerin hafif minerallerle yer değiştirdiği, sıralama aşamasına başlar.

MD modellerinde 60 G, endüstriyel modellerde 200 G'ye kadar çıkabilen santrifüj kuvvet, tanelerin, olukların dibine doğru hareket ederek tabakalaşmasına sebep olur. Bu kuvvete kısmen karşı koyan ve haznenin ayırma çentikleri içinde bulunan akışkanlaştırma deliklerinden püskürtülen su, konsantre yatağının ağır minerallerden oluşmuş formda tutar ve sıkışmasını engelleyerek tabakanın akışkan hale gelmesini sağlar. Çöküşe ters yönde verilen bu basınçlı su, hafif tanelerin eşiği kolaylıkla terk etmesi ve haznenin yukarisına taşınması sağlanır, ağır taneler ayırma çentikleri arasında kalırken, hafif mineral taneleri haznenin üst kısmından taşarlar (Majumder ve Barnwal, 2006). Akışkanlaştırma suyu kuvvetinin, güçlü santrifüj kuvveti sebebi ile ağır mineral yatağının sıkışmasını engelleyecek şiddette olması gerekir (Banisi, 1990).

Beslenen pülp içindeki yüksek özgül ağırlıklı taneler, koninin ayırma çentikleri içinde yakalanmış akışkan haldeki katının içinden geçer ve geliştirilmiş gravite etkisi ile akışkan yatağın içine girerek ayırma çentikleri içinde hapsolmuş aynı hacimdeki düşük yoğunluklu taneler ile yer değiştirirler. Bu, geliştirilmiş gravite kuvveti altında, iri ve ince altın gibi ağır taneler için zenginleştirme bölmesi gibi davranan bir akışkan yatak oluşturur (Coulter ve Subasinghe, 2005). Knelson ayırıcısında zenginleştirme, hafif tanelerin ağır taneler ile yer değiştirmesi sonucu oluşur (Knelson ve Edwards, 1990, Knelson ve Jones, 1994). Knelson ayırıcısındaki

konsantre devresi ve ayırma çentiklerine akışkanlaştırma suyunun girişinin şematik görüntüsü Şekil 2.13’de görülmektedir.



**Şekil 2.13 :** Knelson ayırıcısı konsantre devresi (Söderlund ve Johansson, 2005).

Diğer santrifüj ayırıcılarıyla kıyaslandığında, ayırma mekanizması ya da dizayn özellikleri açısından oldukça farklıdır. Malzemelerin ayırma çentikleri içinde tabakalaşmasına sebep olan santrifüj kuvveti, akışkanlaştırma suyu ile kısmen dengelenmektedir ve çentikler arasında engelli çöküş klasifikasyonu oluşmaktadır (Knelson, 1988, Burt 1992, Laplante 1993).

Knelson ayırıcısının ana operasyon değişkenleri, yıkama suyu miktarı, besleme pülp yoğunluğu ve alıkonma süresidir (Huang, 1996).

Endüstriyel uygulamalarda konsantreyi toplamak için otomatik bir kontrol sistemi mevcuttur. Bu sistem, beslemeyi durdurur, konsantreyi basınçlı su ile temizler ve beslemeyi açar (Knelson, 1988, Knelson ve Edwards, 1990). Knelson ayırıcısındaki konsantre temizleme devresinin şematik görüntüsü Şekil 2.14’te görülmektedir.

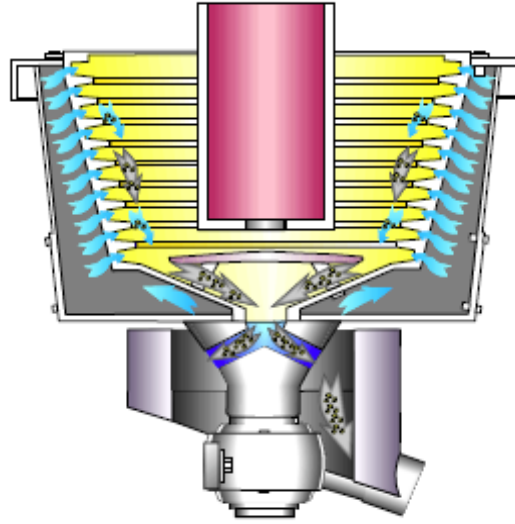
#### **2.2.4 Falcon ayırıcıları**

2008 yılından beri Sepro Mineral Sistemleri adı altında faaliyet gösteren Falcon Konsantratörleri şirketi tarafından üretilmiş, geliştirilmiş gravite yöntemi kullanan ayırıcılar Falcon C, Falcon SuperBowl ve Falcon UF ayırıcılarıdır.

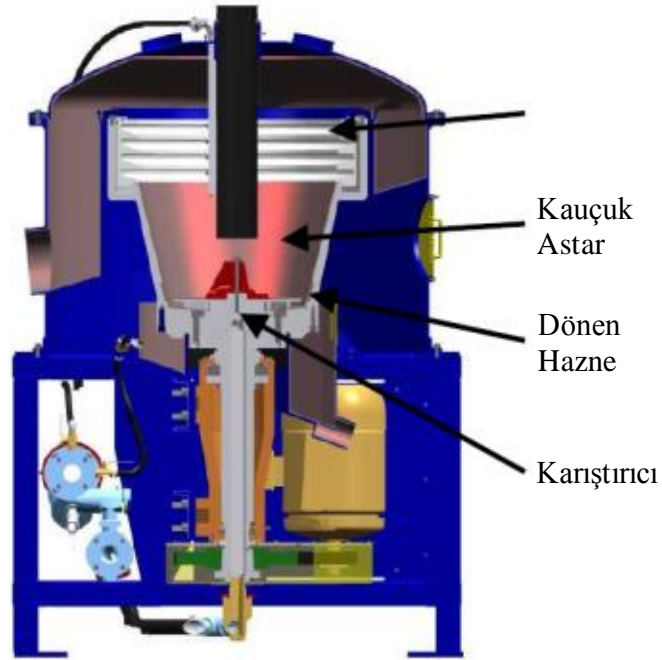
##### **2.2.4.1 Falcon SuperBowl (SB) ayırıcısı**

1930’larda MacNicol tarafından yapılan öncü niteliği taşıyan çalışmalara dayandırılarak 1994 yılında tasarlanmış Falcon SB ayırıcısı, ince altını kazanma

başarısı kanıtlanmış olan tek duvarlı ayırıcılar (Falcon C ayırıcısı) ile geri basınç (back pressure) teknolojisini birleştiren bir ayırıcıdır. Kesikli olarak çalışan, düşey eksenli ve akışkan yataklı bir gelişmiş bir gravite ayırıcısı olan bu ayırıcıda (Şekil 2.15), santrifüj etkisinden doğan kuvvet 300 G ye kadar çıkabilmektedir. Bu yüzden yüksek kapasite ve düşük ayırma yoğunluklarında çalışabilmektedir (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002, McAlister, 1992, McAlister ve Armstrong, 1998).



Şekil 2.14 : Knelson ayırıcısı konsantre temizleme devresi (Söderlund ve Johansson, 2005).



Şekil 2.15 : Falcon SB ayırıcısının şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

Akışkan yataklı Falcon SB gravite ayırıcıları içerdikleri iri besleme özellikleri ile Falcon ürün çeşitliliğini daha da zenginleştirmişlerdir. Maksimum tane boyutu 6 mm'ye kadar çıkabilir. Bu yeni teknoloji, malzemeler üzerinde oldukça yüksek santrifüj kuvvet uygulayabilmekte ve daha az proses suyu kullanarak her boyutta altın kazanımı gerçekleştirebilmektedir. Falcon SB ayırıcısını Knelson ayırıcısından farklı kılan özelliklerden en önemlisi, Knelson ayırıcısında 60 G düzeyinde olan ve santrifüj etkisinden doğan kuvvetin Falcon ayırıcısında 300 G' ye kadar çıkmasıdır. Ayrıca Knelson ayırıcısında malzeme doğrudan akışkan yatağın olduğu zona beslenirken, Falcon ayırıcısında önce ayrılma zonuna besleme yapılmaktadır. Bu yüzden yüksek kapasite ile çalışabilmektedir.

Falcon SB ayırıcısı, düşük su tüketimi, yüksek tenörlü konsantre üretebilmesi, az uygulama tecrübesi ve bilgisi gerektirmesi, düşük bakım ve işletme maliyet giderleri gibi özelliklerinden dolayı endüstri için vazgeçilmez bir gravite ayırıcısı olmaktadır (Ancia ve diğ., 1997, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002, McAlister, 1992, McAlister ve Armstrong, 1998).

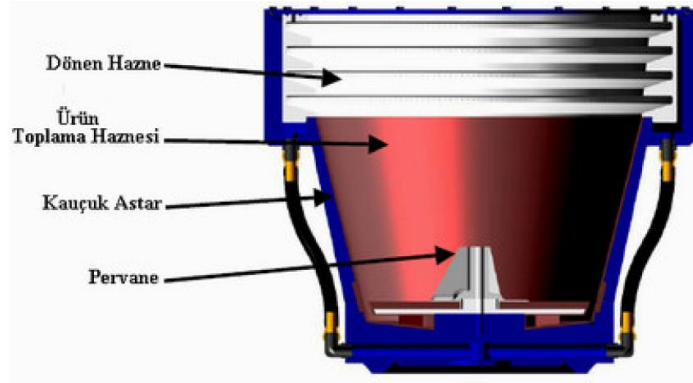
Falcon SB ayırıcısı, esas olarak, altın endüstrisinde liç işleminden önce öğütme devresi siklon alt akımlarından, serbestleşen altının veya plaser tipi altın yataklarından altın kazanımı için tasarlanmıştır. Yapılan bazı uygulamalar, altın liç atıklarının değerlendirilmesinde, gümüş ve platin grubu metallerin kazanılmasında ve cüruf temizlemede de kullanılacağını göstermiş olsa da, günümüzde en çok kullanıldığı alan plaser tipi yataklardan altının kazanılmasıdır (Abela, 1997). Ayrıca birçok çalışma, her uygulamada uygun olmadıklarını doğrulamıştır. Bu tamamen, konsantre yatağının aşırı yüklenmesi ve işlem başında besleme yatağının oluşması gibi ayırma sınırlarına bağlıdır. Ekstra su ilavesinin eksikliği de ayrıca verimini önemli ölçüde sınırlamaktadır (Laplante ve diğ., 1994, Honaker ve diğ., 1995, Lins ve diğ., 1992, Huang, 1996).

SB, altı farklı boyutta hizmete sunulmuştur. Bu ayırıcılar laboratuvar modeli olan L40 ve tesis modelleri olan SB250, SB750, SB1350, SB2500 ve SB5200 ayırıcılarıdır ve kapasiteleri sırası ile 0,25, 10, 80, 150, 250 ve 400 ton/saat olarak belirtilmiştir (Url-5). İlk olarak 1995 yılında İngiliz Kolombiyası'nda plaser tipte altın kazanımı için denenmiştir (McAlister ve Armstrong, 1998). Birçok madende (Lupin Mine, N.W.T., Carol-Lake, Labrador, New Celebration, Westrn Australia) ve araştırma merkezinde (CRM, Quebec, Southern Illinois University, Illinois) çok sayıda pilot uygulama



tamamlanmasına rağmen, ilk endüstriyel uygulama 1998 yılında Tanco Madeni'nde (Manitoba) gerçekleşmiştir (Xiao, 1998). Dünya çapında, 250'den fazla tesiste kullanılmaktadır.

Kesikli bir makine olan Falcon SB ayırıcısının ayırma konisi, dikey olarak yerleştirilmiş, pürüzsüz iç çepere sahip bir hazneden oluşmuştur (Şekil 2.16). Bu bölüm, üçte ikilik dilime tekabül etmektedir. Haznenin üst kısmındaki üçte birlik bölümde ise, konsantre temizlenmesi esnasında yıkama suyunun verildiği deliklere sahip bir konsantre bölmesi vardır (McAlister ve Armstrong, 1998).

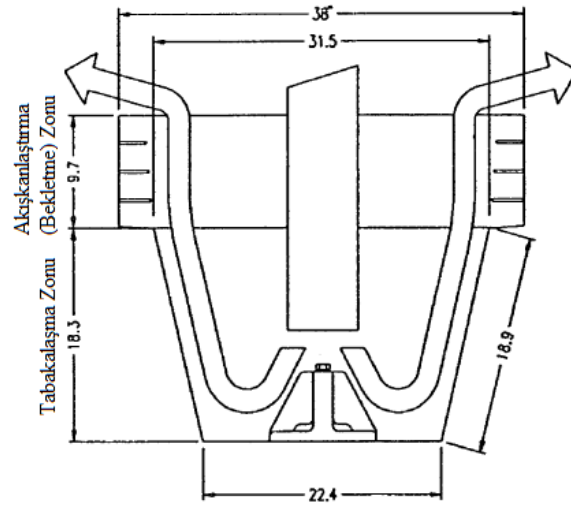


**Şekil 2.16 :** Falcon SB ayırıcısı ayırma haznesi (Url-5).

SB ayırıcısı, altın ve gang taneleri arasındaki ayrımı gerçekleştirmek için iki mineralin özgül ağırlıkları farklarından yararlanır. Besleme, merkezi dikey besleme borusundan pülp halinde, haznenin dibinde sabitlenmiş olan karıştırıcının üstüne yapılır. Bu karıştırıcı, pülpü haznenin duvarına doğru fırlatır ve malzeme üzerine 200 G uygulanacak bir hızda dönen bir rotor ile ivmelendirilir. Oldukça yüksek santrifüj kuvvet, tanelerin özgül ağırlıkları arasındaki farkı artırırken haznenin geometrisi de ağır tanelerin tutulmasına ve hafif tanelerin ise proses suyuyla uzaklaştırılmasına yardımcı olur.

Falcon SB ayırıcısında minerallerin ayrılması iki ayrı zonda olur (Şekil 2.17). Malzeme ilk olarak tabakalaşma zonuna (stratification zone) veya diğer adı ile taşıma zonuna (migration zone) beslenir. Bu zonda, ağır mineral taneleri, pülpün duvar boyunca yukarı hareketi sırasında, gang yatağındaki hafif taneler arasından süzülerek hazne çeperine ulaşmaya çalışır. Haznenin bu kısmında oluşan yatağın altında ağır taneler, üstünde hafif taneler bulunur ve mineral taneleri kaba bir şekilde yoğunluk farkına göre tabakalaşmaya başlar. Haznenin alt kısmında, ağır taneler altta, hafif taneler ise üstte olacak şekilde tabakalanmış olan yatak, ağır tanelerin ayırma

çentikleri içinde hapsolacağı, hafif tanelerin ise Knelson ayırıcısındakine benzer şekilde haznenin üzerinden çıkacağı haznenin ikinci kısmına, akışkanlaştırma zonuna (fluidization zone ) ya da diğer adı ile bekletme zonuna (retention zone) girer. Bu zonda Knelson ayırıcısında olduğu gibi, ayırma çentikleri içerisine verilen su ile engelli çöküş ortamı oluşturulur. Falcon SB ayırıcısında, akışkanlaştırma suyu, haznenin üst kısmında bulunan ayırma çentikleri içerisindeki küçük çaplı deliklerden püskürtülür (enjekte edilir).

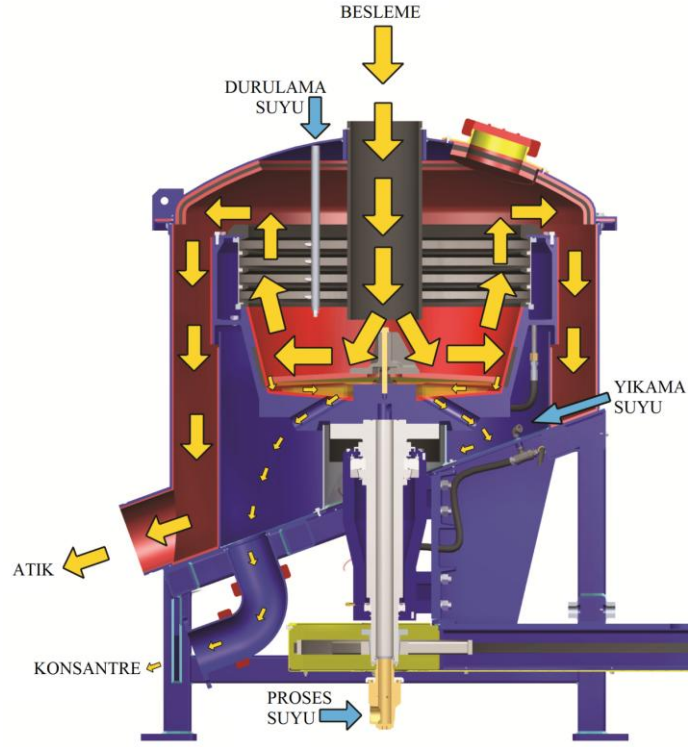


**Şekil 2.17 :** Falcon SB ayırıcısının ayırma zonlarının şematik görünümü (Falcon Concentrators Inc., 1997).

Ayırma çentikleri içerisine verilen su sayesinde, ayırma çentikleri arasında tanelerin özgül ağırlıklarına göre tabakalanmaları tamamlanır. Ağır taneler içerisinde kalmış olabilecek hafif taneler dışa doğru artık akımına atılır ve yıkama suyunun da yardımıyla yukarıya tırmanarak haznenin üst kısmından sistemi terk ederlerken, ağır taneler ise ayırma çentikleri içinde kalır (Lins ve diğ., 1992, Laplante ve diğ., 1994, Honaker ve diğ., 1995, Huang, 1996, Abela, 1997, Ancia ve diğ., 1997, McAlister, 1992, McAlister ve Armstrong, 1998, Parekh ve Abdel-Khalekh, 2002).

Döngü bir kez tamamlandığında konsantre boşaltma işlemi başlar. Otomasyon kontrol sistemi, besleme vanasını kapatır, hazne hızını durulama döngüsü hızına getirir, hazneye yıkama suyu verir. Konsantre hazne tabanına doğru yıkanır ve sahte taban aracılığıyla konsantre oluşuna boşaltılır. Yaklaşık 20 saniye süren durulama döngüsü bittikten sonra, hazne, işlem hızına hızlandırılır. Su açılır ve besleme, açılan esnek vana tarafından beslenir. Döngü, işlem esnasında kendini tekrar eder (Abela,

1997). Falcon SB ayırıcısındaki zenginleştirmenin şematik görünümü Şekil 2.18’de görülmektedir.



**Şekil 2.18** : Falcon SB ayırıcısında zenginleştirmenin şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

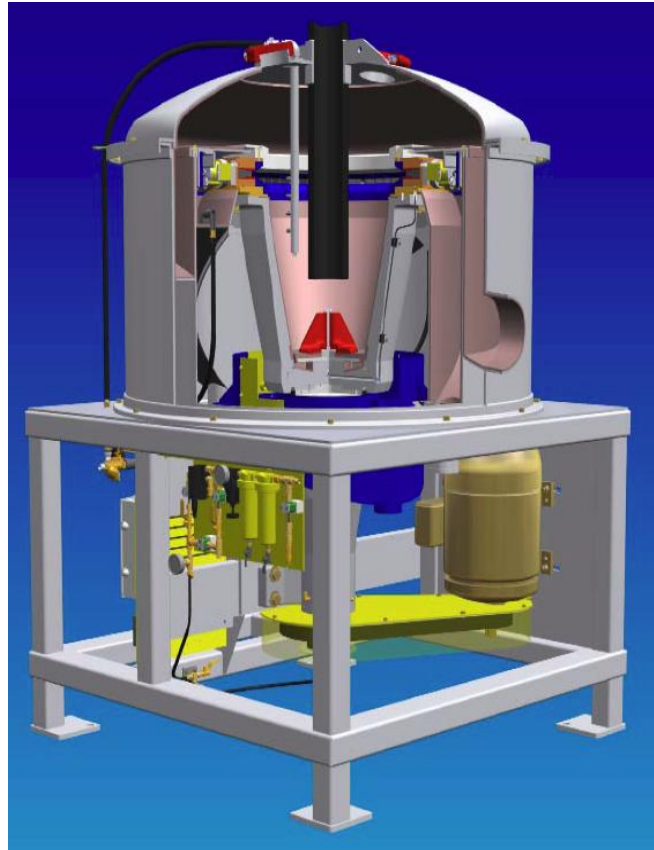
Falcon SB ayırıcısında, akışkanlaştırma bölgesi içindeki cevherin besleme mekanizması akışkanlaştırma teknolojisi kullanan diğer bir ayırıcı olan Knelson ayırıcısındakine göre farklıdır. Knelson’da cevher doğrudan akışkanlaştırma bölgesine beslenirken, Falcon’da taşıma zonunda, kabaca çoğu ağır taneler altta ve hafif taneler üstte olacak şekilde iki katman halinde tabakalaşan yatak akışkanlaştırma zonuna girer. Knelson ayırıcısında, ağır taneler akışkanlaştırma zonuna girdiklerinde gang içinde dağılmış haldedirler. Geri basınç (back pressure) suyunun ve hafif malzemenin ters akışı sebebi ile bazı ağır tanelerin ayırma çentiklerinin içine giremeden atıkla birlikte kaybedilmesi mümkündür. Falcon ayırıcısında, ağır taneler akışkanlaştırma zonuna ulaşmadan daha önce ayrılmışlardır ve akışkanlaştırma zonuna ayırma çentiklerinin duvarları boyunca kayarak girerler. Bu şekilde, ana geri basınç suyu akışına maruz kalmazlar. Bu durum ağır tanelerin, özellikle çok incelerinin, dışarı kaçmasını önler.

Falcon ve Knelson’daki besleme mekanizmalarının bu olgusal açıklaması sonuç olarak Ancia ve diğ. (1997)’nin her iki ayırıcının tane ayırma mekanizmaları

arasındaki farkı görmesine yardımcı olmuştur. Besleme taneleri Knelson ayırıcısında doğrudan akışkanlaştırma bölgesine beslenirken, en küçük altın tanelerinin oluklar arası boşluklara atladığı ve kaybolduğu varsayılmaktaydı. Ancak, Falcon ayırıcısında tabakalanma zonunun varlığı altın gibi ağır minerallerin kaybedilmesini Knelson ayırıcısına kıyasla daha da azaltmakta ve ayrılma yatağının oluşumuna bağlı olarak da, altın tanelerinin tamamen kazanımı mümkün kılmaktadır (Ancia ve diğ., 1997).

#### 2.2.4.2 Falcon C

Falcon ayırıcısı, içi düz, koni şekilli bir haznesinin içerisinde ince taneciklerin çökmesini ve tabakalanmasına yol açan çok yüksek santrifüj kuvvet kullanan gelişmiş bir gravite ayırıcısıdır (Şekil 2.19). İlk olarak, 1987 yılında test edilmiş, yüksek santrifüj alanında çok ince boyutlu altın tanelerinin kazanılması amacıyla geliştirilmiştir.



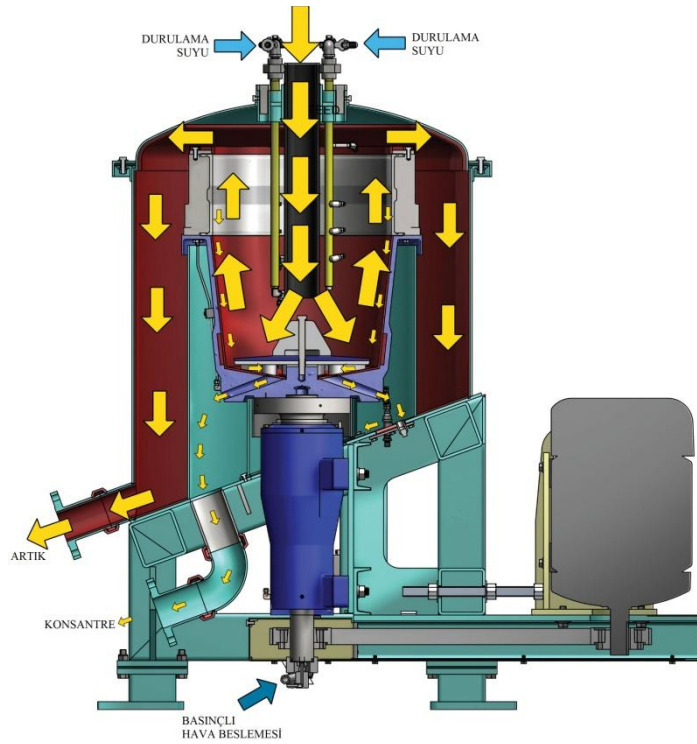
Şekil 2.19 : Falcon ayırıcısı şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

Knelson ayırıcısının aksine, Falcon ayırıcısında ne akışkanlaştırma suyu ne de ağır taneleri yakalayıp hapsedecek ayırma çentikleri vardır. Hazne duvarı boyunca ince akan bir pülp tabakası oluşur ve hidrolik farklılıklardan dolayı taneler tabakalanır. Haznenin iç çeperi boyunca kayan ağır taneler hazne duvarındaki küçük

açıklıklardan geçerek deşarj olurken, tabakalanmış katmanın üzerindeki hafif taneler koni dudağının (cone lip) üzerinden hazneyi terk ederler.

Falcon ayırıcısı, altın, kömür ve temel mineral endüstrilerinde kendine kullanım alanı bulmuştur. Dünyada altın endüstrisinde, plaser tipi yataklardan altın kazanımı için çeşitli üniteler kullanılmakta ve en çok da Kanada'da tantal kazanımında kullanılmaktadır (Abela, 1997).

Piyasada iki seri Falcon ayırıcısı mevcuttur; bu ayırıcılar, artıkların sürekli olarak boşaltıldığı kesikli (ya da yarı-kesikli) üniteler olan UF600 ve UF1500 (Şekil 2.20) ve sürekli üniteler olan C400 (Şekil 2.21), C1000, C2000, C4000 ayırıcılarıdır (Url-5). Sürekli Falcon ayırıcısı aynı zamanda düşük tenörlü yüksek rezervli çok çeşitli cevherler ve ince besleme uygulamaları için uygundur. Birincil ayırıcı, ikincil ya da üçüncül temizleme adımı ya da süpürme ünitesi olarak birçok gravite uygulamasında Falcon'un etkisinin ispatlandığı iddia edilmektedir (McAlister, 1992).



**Şekil 2.20** : Falcon UF ayırıcısı şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

Falcon ayırıcısının bazı uygulanma alanları olarak ince boyutlu altının liç ve flotasyon artıklarından kazanılması, liç verimini artırmak için liç öncesi ön konsantre eldesi, tesis artıklarından ince boyutlu tantalium ve kalayın kazanılması, kömürden kül ve sülfürlü minerallerin uzaklaştırılması ve altın ve gümüş artık barajlarından ön konsantre eldesi örnek gösterilebilir (Operations and Maintenance Manual, 2006).



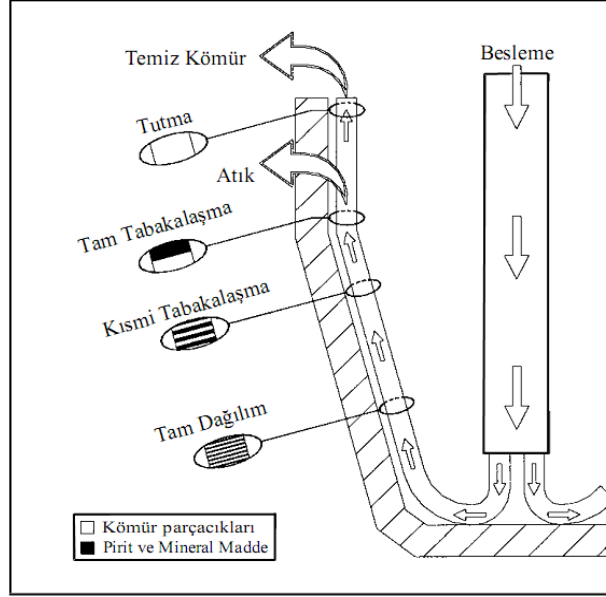
**Şekil 2.21** : Falcon C400 ayırıcısı şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

Falcon ayırıcısı, başlangıçta, ince boyutlu altını 300 G'ye çıkabilen çok yüksek santrifüj alanında zenginleştirmek için geliştirilmiştir. Ana birimi dönel bir şaftın üzerine monte edilmiş olan dikey yerleştirilmiş açık uçlu silindirik haznedir. Gravite alanının büyüklüğü, çeşitli frekanslar ile kontrol edilen rotorun dönme hızına bağlı olarak değişir. Hareketli tek parça olan bu düz yüzeyli hazne, alt kısmı taşıma zonu (migration zone) olarak adlandırılan konik, üst kısmı bekletme zonu (retention zone) olarak adlandırılan silindirik kısımdan oluşur.

Uygulamaya bağlı olarak 1 mm'ye kadar çıkabilen besleme, merkezi dikey besleme borusundan, dönen haznenin alt kısmına, dönme eksenine boyunca, pülp şeklinde beslenir ve haznenin tabanında bir kanatlı vida şeklindeki karıştırıcı (impeller) ile karşılaşır. Pülp, bu karıştırıcı ile taşıma zonu olarak da adlandırılan haznenin eğimli alt bölgesindeki duvarına doğru fırlatılır ve ince tabaka halinde akan akışkan ortam bu eğimli duvar boyunca oluşturulur. Burada diferansiyel ivmelenme ve hidrolik kuvvetlerin farklılığı sayesinde sebebiyle tabakalar meydana getirir. Şekil 2.22'de Falcon ayırıcısındaki tabakalaşma şematik olarak gösterilmiştir.

Bu bölgede dönel haznenin meydana getirdiği geliştirilmiş gravite alanı iki güç bileşenine ayrışır. Duvara dik olan ve ayırmayı sağlayan, kuvvetli güç bileşeni, beslenen tanelerin önce yoğunluk sonra tane büyüklüğüne göre tabakalaşmalarını sağlar. Duvara paralel olan zayıf sürüklenme bileşeni ise tabakalanmış katmanları haznenin üst kısmına doğru iter. Yukarı doğru hareket esnasında hem ağır hem de hafif taneler ayrı yataklar meydana getirirler ve ağır taneler hazne duvarının üzerinde,

hafif olanlarsa hazne duvarına en uzak olacak şekilde sıralanırlar. Çöken taneler ile hazne duvarı arasındaki sürtünme farklı, farklı tabakalardaki tanelerin farklı düşey hızlarda hareket etmesine neden olur.



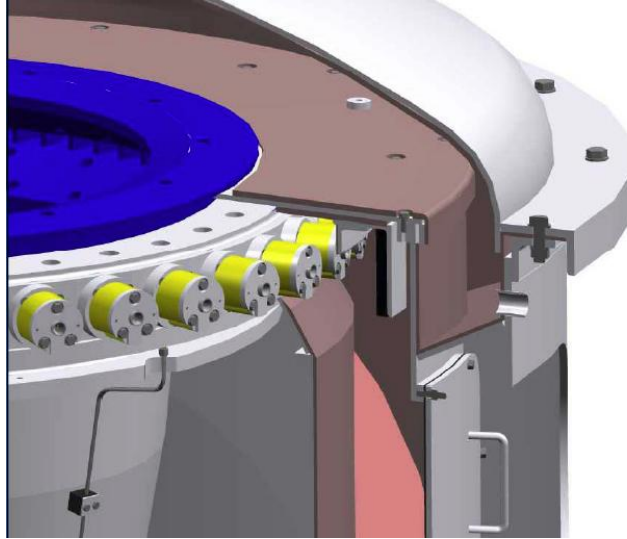
**Şekil 2.22** : Falcon ayırıcısında tabakalaşmanın şematik gösterimi (Honaker ve diğ., 1996).

Konsantre edilmiş ağır taneler, haznenin iç yüzeyinde oluşan bekletme bölgesinde sıralanırlar. Bekletme bölgesi (retention zone) olarak da adlandırılan haznenin bu üst bölgesi dönme eksenine paraleldir. Dolayısıyla, bu bölgede parçaların yukarı doğru itilmesini sağlayan zayıf sürme kuvveti bulunmaz. Bunun yanında hazne çapından daha küçük bir iç çapa sahip olan üst akım dudağı (overflow lip), oluşan yataklarının üst akımdan taşmasını engeller. Dikey güç bileşeninin olmaması ve üst akım dudağı, ağır malzemelerin, hazne duvarına dikey olan santrifüj kuvvet sayesinde haznenin üstünde bulunan konsantre transfer oluklarından (Şekil 2.23) hazneyi terk etmelerine kadar, bölgede kalmalarını sağlar.

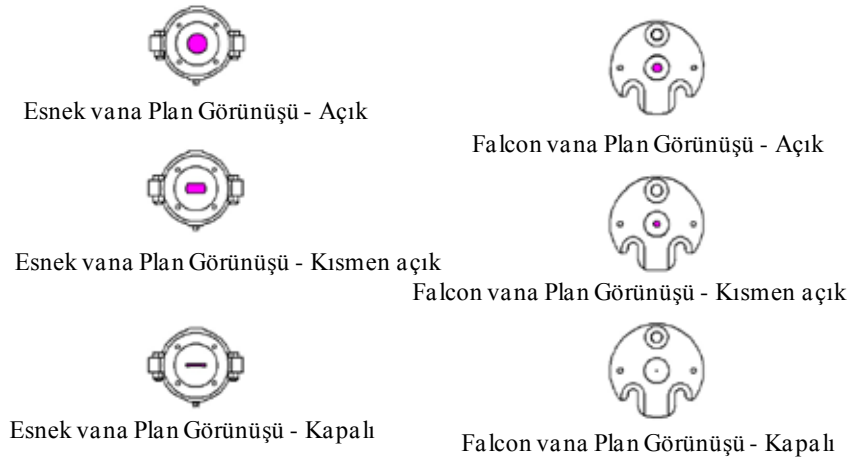


**Şekil 2.23** : Katı transfer olukları (Gillis, A., 2011).

Ayırma çentikleri içinde eşit mesafelere yerleştirilmiş olan katı transfer olukları ve esnek vana-nozul (pinch valve-nozzle) düzeneği (Şekil 2.24) ağır tanelerin alt akım haznesine yönlendirilmesini sağlar. Bu olukların çapı, beslenen malzemedeki en iri tane iriliğinden birkaç kat daha büyük tutulmaktadır. Nozullardan geçen alt akım hızı, açma-kapamayı kontrol eden bir merkezi kontrol birimi sayesinde esnek vanalara (Şekil 2.25) sağlanan havanın yükselip alçalması ile kontrol edilir.



**Şekil 2.24 :** Esnek vana-nozul düzeneği (Gillis, A., 2011).

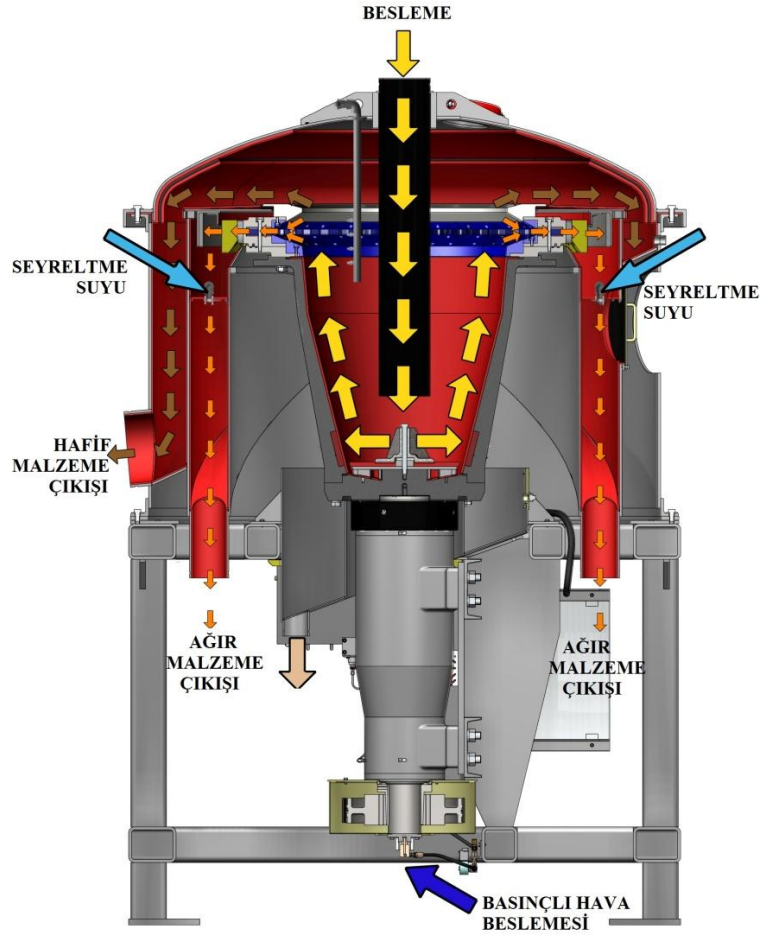


**Şekil 2.25 :** Esnek vanaların açma-kapama şekilleri (Gillis, A., 2011).

Aynı zamanda, haznenin duvarından uzakta tabakalanmış olan hafif taneler ise taşıma bölgesinde biriken momentum ve yukarı doğru akan su filminin kuvvetiyle üst akım dudağını aşip yukarı doğru akarak haznenin üst kısmından sistemi terk ederler ve atık bölgesinden alınırlar. Bu hafif taneler, geliştirilmiş gravite kuvvetinden etkilenmek için çok küçük olan diğer tanelerle birlikte nihai ürünü



oluştururlar (Gee ve diğ., 2005, Majumder ve Barnwal, 2006, Honaker ve diğ., 1995, Abela, 1997, Honaker ve diğ., 1996). Şekil 2.26’da Falcon ayırıcısındaki zenginleştirme şematik olarak görülmektedir.



**Şekil 2.26 :** Falcon ayırıcısında zenginleştirmenin şematik görünümü (Gillis, A., 2011).

Geliştirilmiş gravite ayırıcılarından Falcon SB ve Falcon C ayırıcılarının günümüzde kullanıldığı edildiği birkaç tesis Çizelge 2.1’de verilmiştir (Gillis, 2011).

### 2.3 İstatistiksel Deney Tasarım Yöntemleri

Deneysel tasarım olarak da bilinen istatistiksel tasarım, en az sayıda deneyle maksimum bilgi elde etmek için deneylerin nasıl planlanacağı ve yapılacağına metodolojisidir. 1920’lerde, İngiliz istatistikçi Sir Ronald Fisher tarafından, tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Fisher, ayrıca deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan “Varyans Analizi”(ANOVA) yöntemini de geliştirmiştir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

**Çizelge 2.1 : Falcon C ayırıcılarının kullanıldığı tesislerden örnekler.**

<b>Falcon C ayırıcısının kullanıldığı tesisler</b>		
Donskoi, Kazakistan	C1000	Kromit
Tantalum Company of Kanada	C1000 (2), C400 (2)	Tantalyum, Spodümen
Comsur/Colquiri, Bolivya	C2000	Kalay
Huanuni, Bolivya	C400	Kalay
Kemira, Finlandiya	C1000 (2)	Jips
Susuman, Metso Minerals, Rusya	C1000, C400	Altın
Echo Bay, Kettle River, USA	C4000	Altın
Bluestone Tin, Renison, Avustralya	C2000	Kalay
Bluestone Tin, Collingwood, Avustralya	C2000	Kalay
Sons of Gwalia, Wodgina, Avustralya	C4000, C1000	Tantalyum
NovaGold, USA	C4000 (4)	Altın
Sinchi Wayra - Bolivar, Bolivya	C2000 (2)	Kalay
Manantial Espejo, Arjantin	C4000	Gümüş, Altın
Cameco, Saskatchewan, Kanada	C2000, C1000	Uranyum
SMI/Managem, Fas	C2000, C1000	Gümüş
Elit Madencilik, Türkiye	C4000	Altın, Ağır Mineraller
<b>Falcon SB ayırıcısının kullanıldığı tesisler:</b>		
Phonsack, Laos	SB1350 (2)	Altın
Marjanbulak, Özbekistan	SB5200(5)	Altın
Essakane, Burkina Faso	SB5200 (2)	Altın
Semos-Sadiola, Mali	SB5200	Altın
Newcrest - Telfer Mine, Avustralya	SB5200 (8)	Altın
Alumbrera, Arjantin	SB5200 (4), SB750 (2)	Altın
AngloPlats, Güney Afrika	SB1350	Altın
Quadra -Robinson Nevada, USA	SB5200 (2)	Altın
NovaGold, USA	SB5200	Altın
Gosowong, Endonezya	SB1350 (2)	Altın
Kansanshi, Zambiya	SB5200 (5)	Altın
Boddington, Avustralya	SB5200 (2)	Altın
Meadowbank, Nunavut, Kanada	SB5200	Altın
Mauritanian Copper, Moritanya	SB5200	Altın
Sorigue, İspanya	SB2500 (3)	Altın
Newcrest – Cadia, Avustralya	SB2500 (2)	Altın
Norilsk, Rusya	SB2500 (2)	Altın
Akka/Managem, Fas	SB2500 (2)	Altın
Chatree/Akara, Tayland	SB2500	Altın
St. Ives, Avustralya	SB2500	Altın
Elit Madencilik, Türkiye	SB1350	Altın, Ağır Mineraller

Deney tasarımı daha sonra kimya ve ilaç sektörlerinde de uygulanmış olmasına rağmen, imalat sektöründeki uygulamaları, 1970'lere kadar son derece kısıtlı kalmıştır. 1980'lerin başında yoğun bir şekilde kalite iyileştirme ile ilgilenmekte olan Birleşik Devletler ve Avrupa'daki endüstriyel kuruluşlar, deney tasarımı Japon kalitesinin nedenlerini araştırırken yeniden keşfetmiştir. İstatistiksel süreç kontrolü ve deney tasarımının da içinde bulunduğu istatistiksel yöntemler, bu faaliyetlerin içerisinde anahtar rol oynamaktadır. Kalite iyileştirme en çok, ürün ve süreç geliştirme döngüsü içinde etkilidir. Profesör Genichi Taguchi'nin önderliğinde yoğun

ve etkili olarak uygulanması ve yaptığı yenilikler ve başarılı uygulamalarla, deneysel tasarım yöntemin birçok sektörde tekrar kabul görmesini sağlamıştır (Kasapoğlu, 2007). Yarı iletkenler ve elektronik, uzay gemileri ve bunların teçhizatları, otomotiv, biyoteknoloji ve farmasötik, tıbbi aletler, kimya gibi sektörler, deney tasarımı yöntemlerini uygulayarak daha kolay imal edilen, daha yüksek güvenilirliğe sahip olan ve müşteri gereksinimlerini karşılayan ya da bu gereksinimleri aşan ürünlerin ortaya çıktığı sektörler örnek olarak gösterilebilir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

Birçok faaliyet alanında özellikle de bilim ve teknikte, deneyler önemli yer tutmaktadır. Günümüzde deneyler yeni proseslerin geliştirilmesi, tesislerin optimizasyonu, elde edilen ürünlerin iyileştirilmesi ve yeni teknoloji ve cihazların kullanım koşullarının belirlenmesi gibi işlemlerde önemli rol oynamaktadır.

Bir deneyde bir ya da daha çok proses değişkeni (faktör) değiştirilerek, bir ya da daha çok yanıt değişkeni üzerindeki etkisine bakılır. Deneysel tasarımın amacı, değişkenler arasındaki ilişkileri araştırmak ve çok sayıda değişkenden önemli olanları belirlemektir. İstatistiğe dayanan tüm ilkeler güvenilir bir metot tarafından kanıtlanmış, deneme ve hatalarla desteklenmiştir. Bu sayede, istatistiksel deney tasarımı, verilerden geçerli ve objektif sonuçlar çıkarılmasını sağlayan verimli bir prosedür haline gelmiştir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

Bir çalışmada sonuç üzerinde etkin olan çok sayıda değişken varsa, bu tür çalışmaların tasarlanmasında deneysel tasarım yöntemlerinin kullanılması çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu prosesler bir çok faktör tarafından etkilenen kompleks sistemlerdir. Deneysel tasarım, bu sistemlerin fonksiyonlarla ifade edilmesini ve çok sayıda etkin olan değişkenler arasındaki önemli etkileşimlerin ortaya konulmasını sağlamaktadır. Bir veya birden fazla yanıt üzerinde birkaç bağımsız değişkenin potansiyel etkisinin olduğu deneysel durumlarda uygulanır ve sağladığı avantajlarla optimum koşullarda belirlenen tahmini yanıt değerlerinin belirlenmesine yardımcı olur. Yanıt değişkeni (liç işleminde metal kazanım verimi, flotasyon çalışmalarında yüzdürme verimi, gravite ile zenginleştirmede metal kazanma verimi vb.) deneysel çıktı olarak gözlenirken deneylerin tasarımında bağımsız değişkenler kontrol edilir (Url-6).

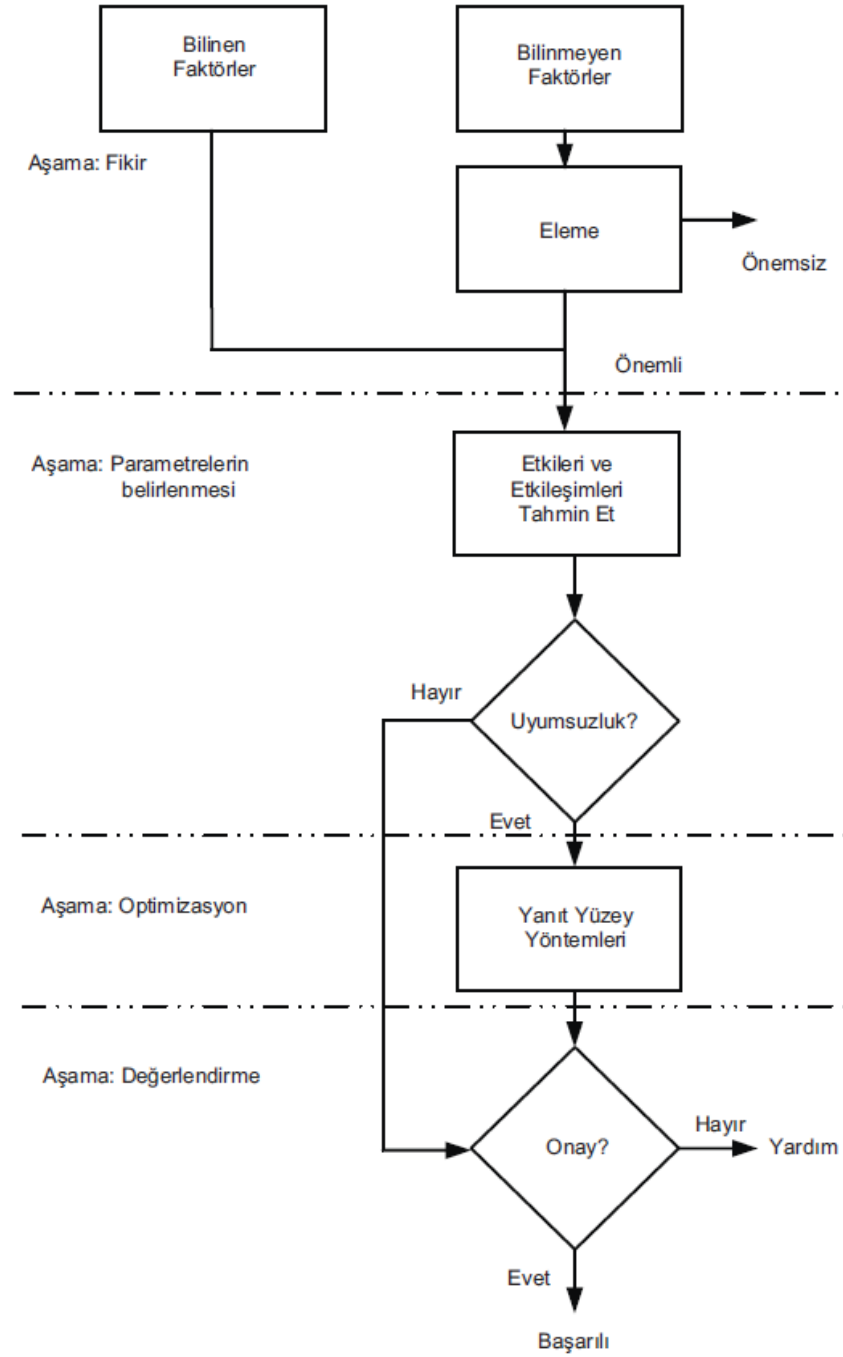
Geleneksel olarak tanımlanan deney sistematğinde, tüm değişkenlerin olası etkilerinin hepsini aynı anda görmek çok büyük sayılarda deneme gerektirir. Bu hem uzun hesaplama süreleri hem de büyük maliyetler gerektirdiğinden zor bir yöntemdir. Örneğın iki seviyeli yedi değişkenli bir prosesin tüm etkilerini görebilmek için tam faktöriyel bir çözümlene yapıldığında gerçekleştirilecek deney sayısı ( $2^7$ ) 128 adettir. Yine benzer şekilde beş seviyeli dört değişkenli bir proses için aynı çözümlene yapıldığında ( $5^4$ ) 625 adet deney yapmak gerekmektedir. Görüldüğü gibi gerekli deney sayıları oldukça fazladır. Özellikle, benzetim dışında, fiziksel olarak gerçekleştirilmek zorunda olunan alanlarda bu neredeyse olanaksız hale gelebilmektedir. Oysaki değişkenlerin eş zamanlı değiştirilmesi, geleneksel deney yöntemine göre daha kısa sürede ve daha az deneysel çalışma ile sonuca ulaşmayı sağlar. Diğer taraftan deneysel tasarımın üstünlüğü, birkaç faktörün eş zamanlı değiştirilmesi ve her bir faktörün bağımsızca değerlendirilmesidir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

Çoğu deneysel tasarıma göre birkaç yaygın basamak vardır. İlk aşama çözülecek problemin belirlenmesidir. Prosesi etkileyen faktörlerin belirlenmesi ikinci aşamadır. Üçüncü olarak farklı kombinasyonlarda faktörlerin deneysel çalışmada incelenmesidir. Son olarak da en iyi sonuç veren kombinasyonun seçilmesidir. Deneysel tasarımda öngörülen strateji Şekil 2.27’de verilmiştir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003).

Deney tasarımı, deneyin amaçlarını ve çalışma için proses faktörlerinin belirlenmesi ile başlar. Deney tasarımı, deneyin yapılmasından ziyade deneyin detaylı olarak planlanmasını gerektirir.

Bir veya daha fazla yanıt üzerinde çok fazla sayıda potansiyel etkiye sahip faktörler bulunabilir. Deney tasarımı, bir ürün veya prosesini etkileyen değişken parametrelerden kritik olanları ve bunların hedef değerlerini tayin eden bir yöntemdir. Esasen yanıt üzerinde etkinliğı henüz belirlenmemiş çok sayıdaki parametreden hangilerinin ve hangi seviyede (parametrelerin inceleme aralıkları) sonuç üzerinde daha etkin olduğı ve deneysel tasarımda kullanılması gerektiğı hususunda önemli fikirler vermektedir. Bu, daha sonra araştırılacak faktörlerin sayısını azaltacak ve parametrelerin alt ve üst limit değerleri hakkında güvenilir bilgiler verecektir. Bu sayede, daha ayrıntılı deneylerde maddi kaynakların ve zamanın etkin şekilde değerlendirilmesi için önemli olmayan parametrelerin

eliminasyonu önceden yapılabilir. Prosesleri matematiksel olarak tanımlayabilmek için en önemli nokta, minimum deney ile maksimum bilgiye ulaşabilmektir.



Şekil 2.27 : Deneysel strateji.

Parametreler ve seviyeleri belirlendikten sonra, biçimsel deney tekniklerini kullanarak birçok değişkenin etkileri aynı anda incelenmektedir. Ayrıca olay ile değişkenler arası matematiksel bir bağıntı kurmak için bilimsel bir yöntem olan regresyon yöntemi kullanılmakta ve ürün veya prosesteki değişiklikler, rastgele bir biçimde ve yüksek istatistik yöntemler kullanılarak incelenmektedir. Bunun yanı sıra

deneylerin iyi bir planlaması ile çok az deneyle çok bilgi toplamak mümkündür. Deneyler pahalı işlemler oldukları için bu husus çok büyük önem taşımaktadır. Başka bir özelliği ise, sonuçların anlaşılabilir ve değerlendirilebilir bilgileri elde eden yapısal bir yaklaşım yolu ile geliştirilebilir olmasıdır. Deney tasarımı günümüzde kendi başına büyük ve geniş bir bilim dalı durumuna gelmiştir (Montgomery, 2009, Lazic, 2004, Antony, 2003, Turan ve Altundoğan, 2011, Url-6).

Deneyisel tarama ile değişkenler ve seviyeleri belirlendikten sonra kullanılacak istatistiksel yöntem seçilir. İstatistiksel temele dayanan kullanılabilir yöntemlerin başında Yanıt Yüzeyi Yöntemleri (YYY, Response Surface Methods) gelmektedir (Montgomery, 2009, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003).

### **2.3.1 Yanıt yüzeyi yöntemleri (YYY)**

Yanıt yüzeyi yöntemleri (Response Surface Methods), bilimsel çalışmalar, mühendislik prosesleriyle ilgili problemlerin çözümü, değişik tipteki endüstriyel süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimizasyonu ve yeni ürünlerin tasarım ve/veya formülasyonlarının iyileştirilmesi için araştırmacılar tarafından kullanılan bir grup girdi değişkeni ile bir ya da daha fazla çıktı değişkeni arasındaki ilişkilerin ampirik olarak incelenmesinde kullanılan matematiksel ve istatistiksel bir yöntemdir. Endüstriyel araştırmalarda geniş bir kullanıma sahiptir (Kwak, 2005, Dean ve Voss, 1999, Montgomery, 2005, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003).

YYY, deneysel strateji, matematiksel model ve istatistiksel sonucu bir araya toplayan bir yöntemdir. İlk olarak 1951 yılında Box ve Wilson tarafından tanımlanmış ve geliştirilmiştir. Box ve Wilson, mümkün olan en az sayıda gözlem değeri ile yanıt yüzeyi üzerinde yanıt değişkeninin maksimum değerini aldığı noktaya ulaşılması amaçlanan deneme düzenlerini ortaya koymuşlardır. Bu amaçla bazı deneme düzenlerini karşılaştırmış ve kompozit denemeleri tanımlamışlardır. YYY tekniğinin kimya, mühendislik, biyoloji, ergonomi, tekstil, gıda endüstrisi, eğitim, psikoloji ve diğer bilim dallarında başarılı uygulamaları bulunmaktadır (Montgomery, 2009).

Yanıt yüzeyi yöntemlerinin en yaygın uygulamaları, bir kaç girdi değişkeninin (faktörün) bir ürün veya sürecin performans ölçüsü veya kalite karakteristiğini etkilediği durumlardır. Bu performans ölçüsü veya kalite karakteristiği yanıt olarak adlandırılmaktadır. Girdi değişkenleri (faktörler) araştırmacı veya uygulayıcı tarafından kontrol altında tutulabilmektedir.

Yanıt Yüzeyi Yöntemleri deneysel sistemli proseslerde, problemlerin analiz edilmesi ve modellenmesi için, deneysel faktörlerle bunların ölçülen cevapları arasında bağıntılar kuran matematiksel ve istatistiksel tekniklerden oluşur. YYY, sistematik bir yöntemdir ve en çok bilgiye ulaşılabilecek noktalarda deney yapılmasını sağlamaktadır. Deneysel tasarım yöntemleri için sırası ile göz önünde bulundurulması gereken aşamalar aşağıda sıralanmıştır (Montgomery, 2001, Kwak, 2005).

- 1.) Problemin durumu ve tanımlanması yapılır.
- 2.) Faktörler, seviye ve aralık seçilir.
- 3.) Yanıt değişkeni seçilir.
- 4.) Deneysel tasarım matrisi oluşturulur.
- 5.) Deneyler gerçekleştirilir.
- 6.) Verilerin istatistiksel analizi yapılır.
- 7.) Sonuçlar değerlendirilir.

Yanıt yüzeyi yöntemlerinde kullanılan teknikler ise aşağıdakileri kapsamaktadır

1. Söz konusu cevabın ölçülmesini sağlayacak deneylerin tasarlanması; Yanıt yüzeyi çalışmalarında veri toplama aşamasının planlanması oldukça önemlidir. Bu aşamada deney tasarımlarının özel bir sınıfı olan yanıt yüzeyi tasarımları kullanılmaktadır. Birinci derece modeller için kullanılan yanıt yüzeyi tasarımları, birinci derece tasarımlar ve ikinci derece modeller için kullanılan yanıt yüzeyi tasarımları, ikinci derece tasarımlar olarak adlandırılmaktadır.

2. (I)'de seçilen tasarımdan toplanan verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin bulunması: Model parametreleri ile ilgili hipotez testleri, uyum yetersizliği testi, artık analizi, verilere en iyi uyumu sağlayacak modelin bulunmasında kullanılabilir. Ayrıca girdi değişkenleri ve / veya yanıt değişkeni üzerine uygulanan transformasyonlar ile modelin uyumu iyileştirilebilir.

3, Optimum yanıt değerini veren koşulların (optimum faktör seviyelerinin) seçimi: Cevabın maksimizasyonu (veya minimizasyonu) hedeflendiğinde ve birinci derece modelin yeterli olduğu durumlarda, cevabın optimum değeri, genellikle incelenen bölgenin dışarıdadır. Bu gibi durumlarda cevabın optimum değerine yaklaşmak

için, en hızlı artış (veya azalış) yöntemi kullanılabilir. İkinci derece modelin yeterli olduğu durumlarda ise, cevabın optimum değeri incelenen bölgede veya bu bölgenin dışında olabilir. Optimum yanıt değeri, incelenen bölgede ise kanonik analiz, bu bölgenin dışında ise yine kanonik analiz ve / veya sırt (ridge) analizi kullanılabilir. Doğrusal olmayan programlama teknikleri, incelenen bölge içerisinde, cevabın optimum değerini bulmak amacı ile kullanılabilir (Dean ve Voss, 1999, Montgomery, 2005, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

Yöntemin temeli, çok sayıda giriş değişkeni (bağımsız değişken) ve bunlara bağlı bir ya da birkaç yanıt (bağımlı değişken) arasındaki ilişkinin belirlenmesidir. YYY uygulanmasının amacı, elde edilecek yanıtları önceden öngörebilecek, sistemi ifade edebilen uygun fonksiyon bulmak ve optimum işletme koşullarını belirlemektir.

Yanıt yüzeyi yöntemleri model regresyon analizi yardımıyla oluşturulur. Bir faktörün ana etkisinin veya diğer faktörlerle etkileşiminin yanıt değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir.

Bir süreçteki girdi değişkenleri ile yanıt değişkeni arasındaki ilişkinin yapısı bilindiğinde, girdi değişkenleri seviyeleri, optimum yanıt değerini elde edecek şekilde seçilebilir. Ancak, yanıt ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkinin gerçek yapısı bilinmediğinde, girdi değişkenlerinin yanıt üzerindeki etkilerinin ampirik olarak bulunması söz konusudur. Diğer bir deyişle, yanıt ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi temsil eden ampirik bir modelin (genellikle bir polinomial) bulunması söz konusudur. Yanıt yüzeyi yöntemlerinde, bir polinomial ile girdi değişkenleri uzayındaki küçük bir bölgede bilinmeyen gerçek ilişkiye yaklaşılabileceği varsayılmaktadır. Bu polinomialler ise genellikle birinci ve ikinci derecedendir.

YYY'nin uygulanabilir olması için aşağıdaki varsayımların yapılması gerekmektedir (Khuri ve Cornell 1987).

1. Bağımlı değişkenleri (ölçülen yanıt), bağımsız değişkenleri (giriş değişkeni) bağlayan  $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$  yapısındaki fonksiyonun değişkenleri, nicel ve sürekli olmalıdır.



2. YYY'nin başarısı, giriş değişkenlerinin bölgesinde, olası en düşük dereceli bir polinom yardımıyla "f" fonksiyonuna yaklaştırmaya bağlıdır.

3. İşletim sırasında, bağımsız değişkenler  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$  (ihmal edilebilir hatalar olması koşuluyla) kontrol edilebilir ve ölçülebilir olmalıdır.

İki düzeyli faktörler içeren deneme düzenleri  $2^k$  faktöriyel deneme düzenleri olarak adlandırılırlar ve sonucunda oluşacak model genellikle ana etkileri ve birinci dereceden interaksiyon etkilerini içerir. Bu modeller birinci dereceden modeller olarak adlandırılırlar. Yani sistemi tanımlayan bağımsız değişkenlerin cevabı doğrusaldır ve böyle bir model eşitlik (2.13)'deki gibi ifade edilebilir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.13)$$

Eğer sistemde eğrisel bir ilişki varsa, fonksiyon ikinci dereceden alınır ve (2.14)'deki gibi ifade edilebilir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (2.14)$$

Veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılarak,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilebilir (2.15).

Burada,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ , bağımsız değişkenler,  $y$ , modelin cevabı,  $\beta_0, \beta_{ii}$  ( $i=1,2,\dots,k$ ),  $\beta_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,k, j=1,2,\dots,k$ ) denklemin bulunması gereken katsayıları,  $\varepsilon$ , hata değeridir.  $\beta$  bilinmeyen denklemlerin katsayıları, en küçük kareler yöntemi ile hesaplanabilmektedir (Dean ve Voss, 1999, Montgomery, 2005, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

İkinci derece modeller, yanıt yüzeyi yönteminde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Myers ve Montgomery (1995, s.7) ikinci derece modellerin yaygın olarak kullanılmasının nedenlerinden bazılarının aşağıdakiler olduğunu belirtmişlerdir:

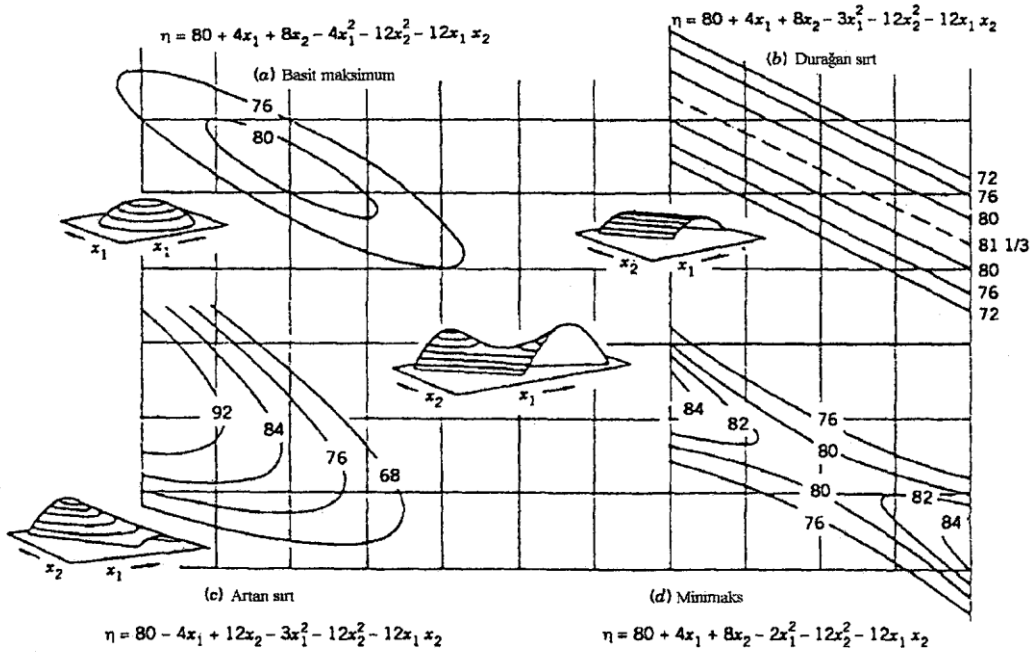
1.) İkinci derece model oldukça esnek ve değişik tipteki fonksiyonel formları tanımlayabilir. Böylece gerçek yanıt yüzeyine yeterli bir yaklaşım

sağlanabilmektedir. Şekil 2.28’de ikinci derece model ile türetilen birkaç değişik yanıt yüzeyi ve eş yükselti eğrisi verilmiştir.

2.) İkinci derece modeldeki parametrelerin ( $\beta$  lar) tahminlenmesi kolaydır. Bu amaçla en küçük kareler yöntemi kullanılabilir.

3.) İkinci derece modellerin, yanıt yüzeyi problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar verdiği birçok uygulama bulunmaktadır.

Yanıt yüzeyi oluşturma amacı, deneysel bir çalışmada sonuç üzerinde etkin olan çok sayıdaki parametreden oluşan bir tasarım düzleminde belirli özellikleri sağlayan bir bölgeyi (etkinliği araştırılan parametreleri kapsayan bir aralık) ve bu bölgeye ait optimum noktayı tahmin etmektir. Örneğin zaman, sıcaklık ve ikisinin birlikte sonuç üzerindeki etkileri araştırılıp optimum değerleri bulunabilir. Sonuçlar üç boyutlu grafik halinde veya kontur haritası olarak ifade edilebilir (Şekil 2.28). Oldukça az sayıda deneysel kombinasyon kullanılarak gerçekte test edilmeyen faktör değeri ve bunların kombinasyonları hakkında tahmin yapılabilir.



Şekil 2.28 : İki değişkenli ikinci derece ile tanımlanan bazı yüzey örnekleri.

YYY, ikinci dereceden bir modeldir ve tüm parametre etkileşimlerini, eğrileri ve lineer olmayan değerleri kapsayabilmektedir. Böylece, YYY, tasarımın sonuç yüzeyi hakkında önemli bilgiler verebilmektedir. Bu tasarım yöntemi kullanılarak, optimal tasarım kuruluma ulaşılabilir. Dolayısıyla, tasarım geliştirilebilir, tasarımdaki sorunlar ve zayıf noktalar tespit edilebilir ve böylece tasarım daha güçlü bir hale

getirilebilir. En çok kullanılan YYY tasarımları, Merkezi Kompozit Tasarımı (MKT) ve Box-Behnken tasarımıdır (Montgomery, 2005, Myers ve Montgomery, 1995, Lazic, 2004, Antony, 2003, Url-6).

### 2.3.1.1 Merkezi kompozit tasarımı (MKT)

İlk olarak Box ve Wilson tarafından oluşturulan ve sonrada Box ve Hunter tarafından geliştirilen, Box-Wilson merkezi kompozit tasarımı genellikle merkezi kompozit tasarımı olarak adlandırılır. Üç seviyeli faktöriyeler kadar bilgi sağlarken tam faktöriyelere göre çok daha az deney gerektirir ve durağan-durum proses yanıtlarının büyük çoğunluğunu tanımlayabileceği kanıtlanmıştır (Box ve diğ., 2005, Obeng ve diğ., 2005).

Yapısında gömülü faktöriyel ( $2^k$ ) ve kesirli faktöriyel ( $2^{k-1}$ ) tasarım içeren, grafik oluşturmaya imkan kılan genişletilmiş merkez noktaları ( $n_0 \geq 1$ ) ve bir grup yıldız noktası ile eğimin tahmin edilmesine olanak sağlayan bir tasarımdır (Box ve diğ., 2005, Url-6).

Merkezi tasarımlar;

- $2^k$  ya da  $2^{k-1}$  faktöriyel noktalar (Küp noktaları olarak da bilinir, k, faktör sayısıdır)
- Eksenel noktalar (yıldız noktalar olarak da bilinir)
- Merkez noktaları içerir.

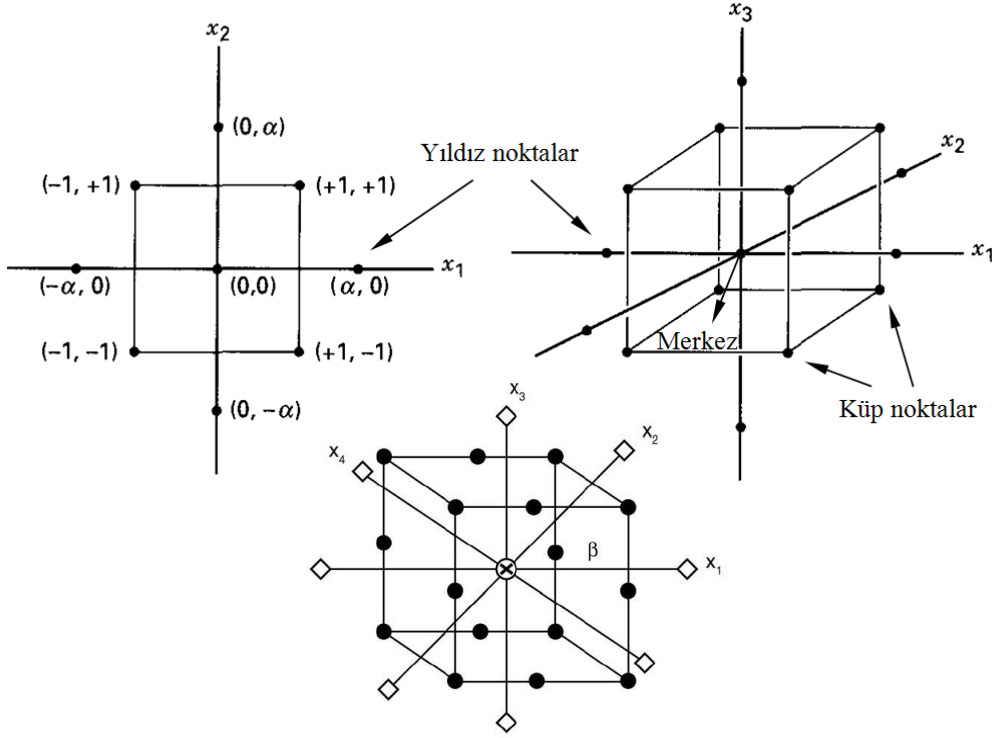
Her bir faktör için merkez noktadan uzaklık, faktöriyel noktalar için  $\pm 1$  birim, yıldız noktalar için faktöriyel noktaların ötesinde  $\pm \alpha$  birimdir.  $\alpha$  değeri, tasarım için istenen özelliklere ve faktör sayısına bağlıdır. Benzer olarak merkez nokta deneylerinin sayısı da tasarım için istenen özelliklere bağlıdır (Url-6).

Tasarımdaki deney sayısı ise aşağıdaki eşitlikle **(2.16)** belirlenir,

$$\begin{aligned} N &= 2^k + 2k + n_0 & k < 5 \\ N &= 2^{k-1} + 2k + n_0 & k \geq 5 \end{aligned} \tag{2.16}$$

k parametre sayısını,  $n_0$  ise merkezi noktada yapılan deney sayısını göstermektedir ve  $n_0$  sayısında bir sınırlama yoktur.

Şekil 2.29'da deneysel tasarım noktaları ile birlikte bir MKT modeli görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere MKT'nin en büyük avantajı, küp noktalar olan ana tasarım noktalarının dışında da deneysel tasarıma olanak vermesidir. Ayrıca, bu noktaların varlığı, MKT ile tasarlanmış bir çalışmaya döndürülebilirlik kazandırmaktadır.



Şekil 2.29 :  $k=2$ ,  $k=3$  ve  $k=4$  için merkezi kompozit tasarımı.

Döndürülebilirliğin elde edilmesi için  $\alpha$ 'nın değeri parametre sayısına bağlıdır. İkinci derece eksen üzerinde  $\alpha$  değeri eşitlik (2.17) ile ifade edilmektedir. Farklı sayıdaki değişkenler için  $n_0$  ve  $\alpha$ 'nın değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

$$\alpha = 2^{\frac{k}{4}} \quad (2.17)$$

$$\alpha = 2^{\frac{(k-1)}{4}}$$

Çizelge 2.2 : Farklı sayıdaki değişkenler için  $n_0$  ve  $\alpha$ 'nın değerleri.

	Değişken sayısı, k								
	2	3	4	5	5	6	6	7	7
Tasarım	$2^2$	$2^3$	$2^4$	$2^5$	$2^{5-1}$	$2^6$	$2^{6-1}$	$2^7$	$2^{7-1}$
$\alpha$	1,414	1,682	2,00	2,378	2,00	2,828	2,378	3,33	2,828
$n_0$	5	6	7	10	6	15	9	21	14

Değişken değerlerinin arzu edilen sınırları belirlendikten sonra faktöriyel noktalar için  $\pm 1$ , merkez noktaları için 0 ve aksenal noktalar için  $\pm\beta$  olarak kodlanırlar.

Kodlar her bir faktör için arzu edilen sınırların bir fonksiyonu olarak Çizelge 2.3'te görüldüğü gibi hesaplanır.

**Çizelge 2.3 : Değişkenlerin kod ve gerçek değerleri.**

Kod	Değişkenlerin gerçek değerleri
$-\beta$	$x_{\min}$
-1	$[(x_{\max} + x_{\min}) / 2] - [(x_{\max} - x_{\min}) / 2\alpha]$
0	$(x_{\max} + x_{\min}) / 2$
+1	$[(x_{\max} + x_{\min}) / 2] + [(x_{\max} - x_{\min}) / 2\alpha]$
$+\beta$	$x_{\max}$

$x_{\min}$  ve  $x_{\max}$  = sırası ile  $x$ 'in en düşük ve en yüksek değerleri,  $\alpha = 2^{k/4}$ ,  $k$ = değişken miktarı

Merkezi kompozit tasarımlar birbiri ardı sıra yapılacak deney planları için önerilir. Bu tasarımlar düzgün olarak planlanmış faktöriyel tasarımlardan bilgi sağlayabilirler. Faktöriyel ve merkez noktalar doğrusal modeli oluşturmak için kullanılabilir ancak ikinci dereceden bir yaklaşımın önemini vurgulayacak kanıt sağlayarak katkı sağlarlar. Merkezi ve eksenel noktaların tasarıma eklenmesi ile merkezi kompozit tasarım ikinci dereceden denklem tahminleme konumuna gelebilir. Ortogonal bloklama ve döndürülebilirlik imkanı da tanıyan merkezi kompozit tasarım ikinci derece modeldeki kuadratik terimlerinin tahminini yapabilir. Ortogonal olarak bloklanmış tasarımlar model terimlerinin ve blok etkilerinin bağımsız olarak tahminlenmesini ve regresyon katsayıları arasındaki değişimin minimize edilmesini sağlar. Döndürülebilir tasarımlar, bütün noktaların tasarım merkezinden eşit uzaklıkta olması ile sabit tahmin varyansını sağlamakta, bu da tahmin kalitesini artırmaktadır.

Gerçekleştirilen bu deneysel tasarım yönteminde kullanılan modelin ANOVA (Varyans analizi) testi ile istatistiksel olarak değerlendirilmesi Bölüm 3.2.1 'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

## 2.4 Santrifüjlü Gravite Ayırıcılarıyla Yapılan Çalışmalar

Bu bölümde literatürdeki santrifüjlü gravite ayırıcıları ile yapılan çalışmalara değinilmiştir. Literatür çalışmaları klasik ve deney tasarım kullanan çalışmalar olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Yapılan çalışmalardan da görülebileceği gibi, özellikle son yıllarda deneysel çalışmalar istatistiksel deney tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Santrifüjlü gravite ayırıcılarından biri olan MGS ile çok ince boyutlu cevherlerin zenginleştirilmesine yönelik birçok araştırma yapılmış ve laboratuvar koşullarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir, bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Sönmez ve diğ. (1998) yaptıkları bir çalışmada Karaburhan krom cevheri gravite ile zenginleştirilmiştir. Çalışma sırasında sarsıntılı masa ara ürünleri 210 mikron altına indirildikten sonra MGS ile zenginleştirilmiş ve % 48,18 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli krom konsantresi % 71,45 verimle elde edilmiştir.

Çilingir ve diğ. (2000) yaptıkları bir çalışmada, Aydın-Karacasu hematit artıkları MGS ile zenginleştirilmiş ve 100 mikron altındaki artıklardan % 68,54 Fe içerikli hematit konsantresi % 82,51 verim ile elde edilmiştir.

Gence'nin (2001) Elazığ-Kefdağ kromitlerinin MGS ile zenginleştirilmesine yönelik yaptığı bir çalışmada % 58,42 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli konsantre % 77,94 verimle elde edilmiştir.

Kangal ve diğ. (2001), düşük tenörlü feldspat cevherlerinin MGS ile zenginleştirilmesine yönelik yaptıkları bir çalışmada, % 0,04 TiO<sub>2</sub> ve 0,04 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli feldspar konsantresi ağırlıkça yaklaşık %50 oranında kazanılmıştır.

Çiçek ve Cöcen'nin (2002) yaptığı bir araştırmanın ilk aşamasında Türkiye'deki çeşitli krom tesis barajlarından alınan ince boyutlu (-106 mikron) krom atıkları MGS ile % 48-50 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerik ve % 65-80 gibi verimlerle geri kazanılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, deney sonuçları MGS ünitesi var olan bir tesise adapte edilmiş ve verimin % 11 arttığı tespit edilmiştir.

Özer ve diğ. (2003), boyutu 38 mikron altında olan ve % 25,58 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli Pulpınar krom artıkları üzerinde MGS ile geri kazanmaya yönelik olarak yaptıkları bir çalışmada, % 47,76 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli konsantre % 71,79 verimle kazanılmıştır.

Ateşok ve diğ. (2003), Bitlis yöresi distenlerinin gravite ile kazanılmasına yönelik olarak yaptıkları bir çalışmada 0,5mm altındaki cevher MGS ile zenginleştirilmiş ve % 56,82 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli konsantre % 67 verim ile elde edilmiştir.

MGS'nin kullanıldığı diğer araştırmalarda kalay, tungsten, tantalyum, krom ve selestit gibi ağır minerallerin zenginleştirilmesi incelenmiştir. (Burt ve diğ. 1995, Chan ve diğ. 1989, 1991a, 199b, Clemente ve diğ. 1993, Traore ve diğ. 1995, Tucker ve diğ. 1991).

Geliştirilmiş gravite ayırıcılarından Knelson ve Falcon ayırıcıları ile yapılmış olan çalışmaların bir kaçına aşağıda kısaca değinilmiştir. Literatüründe belirttiği gibi Knelson ve Falcon ayırıcıları cevher hazırlama endüstrisinde altın kazanımı haricinde de uygulama alanları bulmuştur. Ülkemizde de Knelson ve Falcon ayırıcıları ile birçok araştırma yapılmıştır.

Alp ve diğ. (2004), Mastra (Gümüşhane) cevherlerinden Knelson ayırıcısı ile altın kazanma üzerine yaptıkları bir çalışmada boyutu 74 mikron altındaki cevherden 771,95 g/t altın içerikli konsantreyi % 47,15 verimle kazanmışlardır.

Huang (1996), Laplante ve diğ. (1996), Knelson ayırıcısındaki mineral davranışlarını ve ayırma mekanizmasını anlayabilmek için, sentetik olarak hazırladıkları numuneler ile deneyler yapmışlardır.

Söderlund ve diğ. (2004) Boliden konsantratörüne kurulan Knelson ayırıcısının performansını inceledikleri ve artırdıkları bir çalışmada, gravite ile kazanılan altın miktarını % 13,5'ten % 35,7'ye çıkardıkları ve toplam altın kazanma verimini ise % 67,4'ten % 71,7'ye yükselttikleri belirtilmiştir.

Hanoker ve diğ. (2004), çok ince boyutlardaki kömürün temizlenmesine yönelik olarak yaptıkları bir çalışmada "temizlenmesi zor kömür" olarak adlandırdıkları - 150+44 mikron boyutlarındaki kömür numunesinin Knelson ayırıcısı ile zenginleştirilmesi sonucu % 22 olan kül içeriği % 8'e düşürülmüştür. Aynı grubun ince kömürlerin zenginleştirilmesi üzerine yaptıkları diğer bir çalışmada da % 18 olan kül içeriğini % 8'e düşürmüşlerdir. Bu iki çalışmanın sonuçları Knelson ayırıcısı ile elde edilen değerlerin köpük flotasyonu ile elde edilen değerlerden daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.

Huang ve Meijab (2005), yaptıkları bir çalışmada Knelson ayırıcıları ile altının yanı sıra platin grubu minerallerinde zenginleştirilebileceği ortaya koymuşlardır. Knelson ayırıcısına bilyalı değirmen çıkışının beslendiği şartlarda toplam Pt kazanma verimi % 84,70 olmuş, içerik ise % 2,77gram/ton'dan 137,67 gram/ton'a çıkmıştır. Pd kazanma verimi ise % 56,39 olmuş, içerik ise 1,704 gram/ton'dan 54,27 gram/ton'a çıkmıştır. Siklon alt akımının beslenmesi sonucunda ise Pt'yi % 76,52 verimle kazanmışlar ve 2,66 gram/ton olan içerik 112,70 gram/ton'a çıkmıştır. Pd ise 1,71 gram/ton'dan 47,86 gram/ton'a çıkarken verim % 49,93 olmuştur. Altın kazanma verimleri ise değirmenden besleme ile % 80,50, siklon alt akımından besleme ile de

% 77,79 olmuştur. Sırası ile 3,267 gram/ton olan altın içeriği 155,93 gram/ton'a, 2,79 gram/ton ise 120,81 gram/ton'a çıkmıştır.

Froehling ve diğ. (2007), serbest altın kaçaklarını azaltmaya yönelik olarak yaptıkları bir çalışmada tekrar öğütme devresinden gelen cevherdeki altının %10 kadarını Knelson ayırıcısı ile kazandıkları ve toplam altın kazanımını %3 artırdıkları belirtilmiştir.

Kesikli bir Falcon ayırıcısı olan UF600 (B6) ayırıcısı ile çalışma mekanizmasının ve performansının anlaşılması için hem suni olarak hazırlanan malzemeler hem de cevherler kullanılarak çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir (Laplante ve diğ, 1994).

Sürekli Falcon ayırıcısının, ince kömür temizleme için verimli ayırma gerekliliğini sağladığı Honaker ve diğ. (1995) tarafından tesbit edilmiştir.

Honaker (1998), Southern Illinois University'de, sürekli C40 model Falcon ayırıcısının, ince kömürün (-1+0,038 mm) piritik kükürdünün uzaklaştırılarak iyileştirilmesindeki performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı deneyler yürütmüştür. Güney Afrika'da, Kleinkopje Colliery, tikiyer alt akımını kabul edilebilir kül seviyelerine iyileştirmek amacıyla C20 ile deneyler yapmıştır (Abela, 1997).

Hanoker ve diğ. (1998) yaptıkları bir araştırmada -0,6+0,044mm boyutlu Illinois kömürlerinden %87,8' verim ile elde edilen temiz kömürdeki kül içeriği %17,5'tan %3,5'e, %0,55 olan piritik kükürt içeriği %0,15'e düşürülmüştür. Yine Hanoker ve Govindarajan'ın (1998) yaptığı başka bir çalışmada %80'lik bir verimle -0,6+0,150mm boyut aralığında %22 olan kül içeriği %8'e, -0,150+0,025mm boyut aralığında ise %32 olan kül içeriği %15'e düşürülmüştür. Piritik kükürdün de yaklaşık olarak %90'ı kömürden uzaklaştırılmış ve %7,9 olan kükürt içeriği %2,7'ye düşürülmüştür.

Falcon ayırıcısının sadece altın ve ağır metal kazanımı için değil, aynı zamanda kömür zenginleştirme alanında kullanımı üzerine de araştırmalar yapılmıştır. Çok ince boyutlu kömürdeki piritin uzaklaştırılmasında, gravite esaslı ayırmanın, yüzey özelliği esaslı ayırmanın yerine geçme potansiyelinden bahsedilmektedir (Demir ve diğ. 1999). Kömür şlamlarının değerlendirilmesine yönelik yapılan birçok pilot ve tam ölçekli yeni çalışmada, santrifüjlü, geliştirilmiş gravite ayırıcılarından yararlanılmıştır (Honaker, R. Q. ve diğ. 1995, 1996, 1998, Honaker ve Patil, 2002).



Falcon ayırıcısının ucuz işletme maliyeti, yok denecek kadar az çevresel etkisi gibi özellikleri göz önüne alınmasa bile Falcon ayırıcısından alınan sonuçlar ile gelişmiş flotasyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında potansiyel olarak Falcon ile ayırmanın en iyi flotasyon teknolojisinden daha iyi sonuçlar verdiği iddia edilmektedir (Demir ve diğ. 1999).

Kentucky Üniversitesinde Abdel-Khalekh ve diğ. (2000) tarafından pirit ve jips atıklarının değerlendirilmesi için yapılan bir proje kapsamında, pirit Falcon ayırıcısı, flotasyon ve ağır ortam ayırıcısı ile zenginleştirilmeye çalışılmıştır. Araştırma sonucunda Falcon ayırıcısının en ekonomik proses olduğu belirlenmiştir.

Alp ve diğ. (2005), Mastra (Gümüşhane) cevherlerinden Falcon SB ayırıcısı ile altın kazanımına yönelik olarak bir araştırma yapmışlardır. Deneyler sonucunda 74 mikron altında olan cevherdeki altını %7,2 miktar ve %81 verimle kazanmışlardır. 262 g/t olan altın içeriği temizleme sonrasında 1760 g/t'a çıkmıştır.

Liu ve diğ. (2006), petrol kumlarından elde edilen flotasyon artıklarındaki titan ve zirkonu geri kazanmaya yönelik olarak çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada flotasyon ve Falcon SB santrifüjlü gravite ayırıcısı kullanmışlardır. Flotasyon deneyleri sonucunda ağır minerallerin %90'ı 85°C'de reaktif olarak kazanılmıştır. Aynı sonuç NaOH ve/veya sodyum oleat de kullanarak 50°C'de alınmıştır. Ancak flotasyon konsantresine artık bitümün %90'ı ve kil/şlamın da büyük çoğunluğu gelmiştir. Öte yandan Falcon ayırıcısında ağır metallerin % 85'inden fazlası geri kazanılmış ve konsantredeki bitüm miktarında %30 azalma olmuştur. Ayrıca Falcon ayırıcısında iri zirkon ve titanyum minerallerinin çoğunluğu ağır ürün olarak ayrılırken, kil/şlam ve bitüm hafif ürün olarak ayrılmıştır. Artık bitüm ve ağır mineraller arası kesin ayırım iki ürünüde geri kazanımının mümkün olacağını belirtmişlerdir. Falcon konsantresindeki tane boyutunun daha iri olması sebebiyle sonraki işlemlerin daha kolay uygulanabileceği belirtilmiştir. Bundan dolayı, Falcon ayırıcısı, petrol kumlarındaki bitüm ve ağır minerallerin ayrılmasında flotasyon gibi etkili olan bir prosesten bile daha iyi ayırma yaptığından bu atıkların değerlendirilmesinde tavsiye etmişlerdir.

Birçok altın tesisinde, siyanür liçinden ve flotasyon atıklarından gelen sülfidlerin ve çok ince boyutlu artıkların altın içerdiği belirtilmiştir. Sülfid ve gang tanecikleri içine kapanmış altının kazanımını etkileyen en önemli sorun bunların içerisindeki altının

serbestleşmemiş olmasıdır. Gee ve diğ. (2005), bu tip malzeme içindeki altının ince öğütme ile serbestleşmesini izleyerek, altını Falcon B tipi santrifüjlü gravite ayırıcısında zenginleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucu flotasyon yöntemine nazaran daha ucuz ve seçimli ayırma ile daha iyi sonuç elde edilmesi nedeniyle bu tip malzeme için Falcon gravite ayırıcısını tavsiye etmişlerdir.

Gray ve diğ. (2003) yayınladıkları bir bildiriye, altın kazanımında siyanür liçine karşı geliştirilmiş gravite ayırıcılarını, özellikle Falcon ayırıcısını önermişlerdir.

Knelson ve Falcon SB ayırıcılarının birbirlerine olan benzerliklerinden dolayı da birçok araştırmacı bu ayırıcıları birbirleri ile kıyaslayan çalışmalar yapmışlardır.

Knelson ve Falcon SB ayırıcılarının karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma Ancia ve diğ. (1997) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada çeşitli boyutlardaki kuvars, tungsten, ilmenit ve galenden oluşan suni olarak hazırlanmış numuneler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Falcon SB ayırıcısının, hazırlanan her karışımda Knelson ayırıcısından daha iyi ayırma yaptığı ve ayırma verimlerinin tüm boyut ve karşı/geri basınç (counter/back pressure) değerlerinde %100'e yakın olduğu belirtilmiştir.

Knelson ve Falcon ayırıcıları arasındaki en önemli fark, Knelson ayırıcısında santrifüj etkisinden doğan kuvvetin değeri yerçekimi kuvvetinin 60 katı kadar iken, Falcon ayırıcısında bu değer 300 G olmasıdır. Bundan başka, Falcon ayırıcısında ağır tanelerin hazne içerisinde ayrılması konsantrasyon kademesinden önce olmaktadır. Bu iki fark, Falcon ayırıcısında elde edilen ayırmanın Knelson ayırıcısından daha iyi olmasını açıklayabilir.

Bundan sonraki kısımda ise deneysel tasarım kullanılarak yapılan çalışmalardan birkaçı örnek olarak verilmiştir. Araştırmaların yapıldığı yıllara bakıldığında, ülkemizde son yıllarda bazı araştırmacılar tarafından deneysel tasarım ile yapılan çalışmaların sayısı artmıştır.

Paul ve Honaker. (1994), İllinois kömürlerinin geliştirilmiş gravite ayırması ile zenginleştirilmesi konulu proje raporunda, Falcon ayırıcısında yapılacak olan deneylerin şartları yanıt yüzeyi yöntemlerinden, Box-Behnken tasarım yöntemi ile belirlenmiş, kül, kükürt uzaklaştırma ve ayırma verimi gibi yanıt değişkenleri üzerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanan ampirik bir model üretilmiş ve bu model çeşitli metotlarla her bir değişkenin optimum değerini bulmak için test edilmiştir.

Honaker ve diğ. (1996) tarafından, deney programlarını istatistiksel tasarıma dayalı olarak yürüttükleri Falcon ve Knelson ayırıcıları kullanarak ince kömürün zenginleştirilmesi üzerine yaptıkları oldukça geniş kapsamlı bir araştırmanın özeti kısaca verilmiştir. Bu çalışma, Falcon ve Knelson ayırıcılarının ayırma prensiplerinin anlaşılması açısından önemli bir çalışmadır.

Hem Falcon'da hem de Knelson'da, operasyon parametrelerinin etkilerinin değerlendirilmesi ve optimum zenginleştirme performanslarının tanımlanması için deney programları istatistiksel dizayna dayalı olarak yürütülmüşlerdir. Her iki ünite için de verilen toplam 27'şer deneyde besleme miktarı, PKO, alt akım açma ve kapama zamanı ve akışkanlaştırma suyu miktarı belirli değerler arasında alınmıştır. Toplam kükürt uzaklaştırma yönünden Falcon ve Knelson ayırıcılarının ikisi de teorik yıkanabilirlik eğrisine göre karşılaştırıldığında neredeyse tam ayırma gerçekleştirmişlerdir. Bununla birlikte, Falcon ayırıcısı özellikle -210+37 µm boyut grubunda bir dereceye kadar mükemmel kükürt uzaklaştırma sağlamıştır. -210+37 µm boyut grubunda piritik kükürtün %100'e yakını uzaklaştırılmıştır. Toplam sülfürün ideale yakın ayrılacağı beklenilmesinin sebebi olarak kömür (1,3 g/cm<sup>3</sup>) ve pirit (4,5 g/cm<sup>3</sup>) tanelerinin arasındaki büyük yoğunluk farkını öne sürmüşlerdir.

Knelson ayırıcısında, besleme hızı artınca ayırma verimi düşmüştür. Bunun sebebi tanelerin tutma süresinin kısalması sonucu yüksek kül içeren önemli miktarda tanenin üst akımdan kısa devre yaparak çıkmasıdır. Diğer yandan, Falcon ayırıcısında iki boyut içinde en yüksek ayırma verimine 1,2 litre/saniye'de ulaşılmış daha hızlı besleme hızlarında da verim aynı değerde kalmıştır.

-600+210 mikron boyut aralığında yapılan çalışmalar sonucunda, 70 G'nin üzerinde ayırma negatif olarak etkilenirken, -210+37 mikron boyut aralığında yapılan çalışmalarda ise pozitif etki yarattığı görülmüştür. -600+210 mikron boyut aralığında 50 G değeri optimum olarak tespit edilirken, -210+37 mikron boyut aralığında 125 G optimum olarak bulunmuştur.

Optimum değer altında, bir miktar kül içeren tane üst akım ürününden alındığından yanabilir verim yüksek olmaktadır. Diğer yandan optimum değer üzerinde, iri kömür taneleri alt akımdan atığa karışarak kaybedilmektedir. Böylelikle, hacimsel besleme hızı ve uygulanan santrifüj kuvvetin büyüklüğü, bütün ayırma performansını kontrol eden çalışma değişkenleridir.

Falcon ayırıcısında yapılan zenginleştirmeler sonucunda, 300 mikron üzerindeki ayırmalarda neredeyse spiral ile aynı değerde olan yüksek ayırma verimlerine ulaşılmıştır.

-600+37mikron boyut aralığında yapılan zenginleştirmeler sonucunda kül içeriğini önemli ölçüde azalmış ve % 90'dan fazla yanabilme verimine ulaşılmıştır. Aynı sonuçlar -600+150 mikron boyut aralığında yapılan çalışmalardan da elde edilmiştir. Ancak uygulanan santrifüj kuvveti 300 G'ye kadar çıkarılmasına rağmen, 38 mikrondan küçük kül içeren malzemenin uzaklaştırılmasında yetersiz kaldığı anlaşılmıştır..

Graviteye dayalı prosesin verimi genel olarak ayırım eğrileri ile ölçülür. Eğriler, çok ince taneler için, proses akışından alınan numunelerin santrifüj yıkanabilirlik analizlerinden elde edilen veriler ile oluşturulur. Yapılan bu çalışmada, 72 G gibi düşük santrifüj kuvvette bile, özgül ağırlık kesme noktası ( $D_{50}$ ), -210+37mikron boyut grubu için 1,8'e, +300 mikron boyut grubu için 1,6'ya düşmüştür. +300 mikron boyut grubu için, muhtemel hata (Ep) değeri 0,15'ten 0,20'ye çıkmıştır. Bu da, tane büyüklüğünün artmasıyla birlikte proses veriminin düştüğünü göstermektedir. Büyük taneler, haznenin duvarına giden tüm ağır taneler ile birlikte yatak boyunca ve alt akım tahliye kanalına dağılırlar. Büyük tanelerin çokluğuna rağmen, hafif taneler üst akım ürününe giderler, önemli bir oranı yatağın içinde takılır ve alt akım atık akışına gelir. Diğer yandan, uygulanan santrifüj alandan önemli ölçüde etkilenen -210+37 mikron boyut aralığındaki taneler, özgül ağırlıklarına göre, daha verimli olarak ayrılma eğilimi göstermişlerdir. Ancak, çok ince ağır taneler, yeterli olmayan santrifüj kuvvetine bağlı olarak üst akıma atlama eğilimi göstermişlerdir. Santrifüj kuvveti büyüklüğünün ayrıca -210+37 mikron boyut grubunun işlenmesinden ulaşılan  $D_{50}$  ve Ep değerleri üzerinde de önemli etkisi olduğu görülmüştür.  $D_{50}$ , 72 G'de 1,8 iken, 199 G'de 1,50'ye düşmüştür. Minimum Ep değeri 0,10 ve maksimum proses verimi 127 G'de elde edilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda, yüksek santrifüj alanı kullanan Falcon Ayırıcısının, çok ince kömür ayırmada düşük özgül ağırlık kesme noktasına ulaşabildiğini göstermiştir. Bu da, düşük miktarda kükürt ve kül içeren kömür konsantresi üretiminde önemli bir noktadır. Diğer geliştirilmiş gravite ayırıcıları -210+37 mikron boyut grubu için düşük özgül ağırlık kesme noktalarına ulaşamamaktadır. Falcon ayırıcısında 1,5-1,8 olan özgül ağırlık kesme noktası, Knelson ayırıcısında 1,9,

MGS'de 2,1 ve Kelsey jigin de 2,0 olmaktadır. Farklı ayırıcıların optimum işletme şartları altında neredeyse aynı  $E_p$  değerlerine ulaşılsa da, g-kuvvetindeki artışın  $D_{50}$ 'nin düşüşüyle sonuçlanması, uygulanan santrifüj kuvvet ve  $D_{50}$  değeri arasında bir ilişkinin kanıtı olarak görülebilir. Bu çalışmada, yüksek santrifüj alanları ile Falcon ayırıcısının, 37 mikron boyutuna kadar, önemli oranda kül ve toplam kükürt uzaklaştırabildiği görülmüştür.

Ancak her bir çalışmada yoğunluk kesme noktasının 1,9-2,1 gibi yüksek bir değerde kaldığı ve kapasitenin düşük olduğu belirtilmiştir. Büyük olasılıkla bunun sebebi sağlanan santrifüj kuvvetin sadece doğal santrifüj kuvvetin 60 katından büyük olmamasıdır (Luttrell ve diğ., 1995). Diğer yandan, Falcon ayırıcısı 300 G'ye kadar olan bir santrifüj kuvveti uygulama kabiliyetine sahiptir. Bu sayede düşük yoğunlukta kesme noktasına ve yüksek kapasiteye imkan vermektedir. Honaker ve diğ. (1995) kesikli çalışan Falcon SB ayırıcısından 10 mikron altındaki kesme boyutu ve % 90'dan fazla kazanma verimi ile yüksek kül ve toplam kükürt uzaklaştırma elde etmişlerdir.

Honaker (1998) yaptığı bir çalışmada, endüstriyel boyutlu C40 Falcon ayırıcısı ile ince boyutlu kömürlerin zenginleştirilebilirliğini araştırmıştır. Bağımsız değişkenlerin (parametrelerin) etkileri ve C40 Falcon ayırıcısının performansının optimize edilmesi için istatistiksel deney tasarım programı kullanmışlardır. C40 ayırıcısı ile yapılan -600+37 mikron boyut aralığındaki deneyler sonucunda neredeyse yüzdürme-batırma analizi değerlerine yaklaşılmış, temiz kömürün %95'ten fazlası %80 verimle kazanılmıştır. 75 mikron altında yapılan ayırma köpük flotasyonundan daha verimli çıkmıştır. Bununla birlikte, 37 mikron altında daha iyi kükürt uzaklaştırma oranı elde edilmiştir. Optimum koşullarda, 150 mikrondan büyük boyut aralıklarında hata faktörü ( $E_p$ ) 0,12 olarak bulunmuştur ve boyut küçüldükçe  $E_p$  değerinin eksponansiyel olarak arttığı görülmüştür.

Endüstride 1 mm.den küçük boyutlu kömürleri kazanmak için ağır ortam siklonlarını kullanma teşebbüsleri olmuştur. (Osborne 1988) İnce kömürlerin efektif olarak ayrılmasını sağlamak için geliştirilmiş gravite alanına ihtiyaç vardır. Bu da 15-20 cm.lik küçük boyutlu siklonlarda ve/veya 690 kPa'dan büyük besleme basınçları ile elde edilebileceği yapılan çalışmalar ile ortaya çıkmıştır. Önceki deneysel çalışmalarda, ihtiyaç duyulan santrifüj kuvvetin doğal yer çekimi ivmesinin 100-300 katı olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu çalışmalardan yola çıkarak yapılan çalışma

olumlu da olsa sistemin özel pompa vb. gibi ekipman ihtiyacı yüzünden yüksek işletme maliyetlerine sebep olacağı anlaşılmıştır (Torak ve Suordini, 1977). Klima ve diğ. (1995) bu problemlerden kaçınmak için gereken geliştirilmiş gravite alanının mekanik hareket ile sağlanabilirliğini araştırmış ve bu amaçla laboratuvar tipi santrifüjlü bir cihaz kullanmıştır ve -100+25 mikron boyut aralığında yüksek kül uzaklaştırma verimleri elde etmişlerdir. Honaker ve diğ. (2000) bu çalışmanın olumlu sonuçlarından yola çıkarak C10 tipi Falcon ayırıcısında su ve ağır ortam kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deney parametreleri olarak hava basıncı, hazne hızı, PKO ve ağır ortam yoğunluğu seçilmiş ve bu bağımsız değişkenlerle istatistiksel olarak tasarlanmış deney serileri oluşturulmuştur. Test verilerine dayanarak hazırlanan yanıt yüzeyi grafiklerinden elde edilmiştir. -1+0,044 mm gibi iri bir boyut aralığında yapılan ayırma sonucu 0,05'ten küçük hata faktörü (Ep) elde edilmiştir. Bu hata faktörü genellikle iri kömür zenginleştirmede kullanılan ağır ortam siklonlarının hata faktörü değeri ile aynıdır (Osborne 1988). Ek olarak, 1,42 gibi düşük bir ayırma yoğunluğu ( $d_{50}$ ) elde edilmiştir. Bu özellikleri sayesinde temizlenmesi zor kömür niteliğindeki bir kömürün %29 olan kül içeriğini yaklaşık %7 içeriğine %90 verimle düşürülmüştür. Ayırma performansının yüksek olmasından yola çıkarak gravite temelli ayırma proseslerinin ince boyutlu kömürler için köpük flotasyonundan daha selektif olduğunu iddia etmişlerdir (Honaker ve diğ., 2000).

Honaker ve Patil (2002) yaptıkları bir çalışmada, ağır ortam ayırmasını geliştirilmiş gravite ortamında yapmak için Falcon SB ayırıcısı kullanmışlardır. Deney programını Box-Behnken metodu kullanarak tasarlamışlar ve elde ettikleri sonuçlardan ürettikleri modelleri ANOVA tablosu oluşturularak test etmişlerdir. Testler sonucunda modelleri, parametrelerin önem derecelerine göre revize etmişlerdir. Daha sonra yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile bağımsız değişkenlerin birbirleri ve yanıt ile ilişkilerini yorumlamışlardır.

Bhaskar ve diğ. (2002), flotasyon sonucu elde edilmiş kaba kurşun konsantresinden grafitin MGS ile uzaklaştırılmasına yönelik olarak yaptıkları bir çalışma için ayırmaya etki eden bağımsız değişkenler ve bu değişkenlerin uygulama değerlerini belirleyerek bir deney seti oluşturmuşlardır. Deneyler sonucu elde edilen verilere basit metodoloji (simple methodology) yöntemi uygulayarak, MGS ile yapılan zenginleştirmeyi  $y=k+x+y+z+\dots$  şeklindeki bir formülle tanımlamışlardır. Daha

sonra deneysel ve model tahmin değerleri karşılaştırılarak modelin güvenilirliği  $R^2$  yöntemi kullanılarak test etmişlerdir. Kurşun içeriğine göre oluşturdukları modelin  $R^2$ 'si 0,944, çıkmış ve modelin güvenilir olduğunu iddaa etmişlerdir. Ayrıca elde edilen verilerin birbirleri ile olan ilişkileri ikinci dereceden denklemlerle tanımlanarak  $R^2$ 'leri ile gerçeğe yakınlıkları hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ise %2'den düşük grafit içerikli kurşun konsantresi elde edilebilmiş ve grafit, silika ve diğer gang mineralleri yüksek verimle sistemden uzaklaştırılmıştır. Kurşun konsantresinden MGS ile grafitin uzaklaştırılma oranı %93,9 olmuştur.

Honaker ve Das (2004) ok ince boyutlu kömürlerin santrifüjlü akışkan yataklı ayırıcılar ile temizlenmesi konulu çalışmalarında Knelson ayırıcısı kullanmışlardır. İstatistiksel olarak tasarladıkları deney programına göre elde ettikleri sonuçları kuadratik modeller ile ifade etmişlerdir. Bu modelleri ANOVA testine tabi tutmuşlar ve elde ettikleri yanıtlar için modellerin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Testi  $R^2$ , F, p ve Prob>F değerlerini göz önüne alarak gerçekleştirmişler ve sonrasında yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile yorumlamışlardır. Honaker ve diğ. (2005), aynı çalışma yöntemini Knelson ayırıcısında ayırma etkinliğini geliştirmek için hava enjekte edilmesi konulu çalışmalarında da kullanmışlardır.

Coulter ve Subasinghe (2005) yaptıkları bir çalışmada, Laboratuar tipi Knelson ayırıcısında farklı besleme ve operasyon parametreleri altında akışkanlaştırma durumunu belirten bir kriteri tanımlamak için başlangıç niteliğinde olan bir matematik model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelin, endüstriyel ünitelerdeki ayırmayı tahmin edebileceğini iddia etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada, Knelson ayırıcısı 30 mikronun altındaki malzemeden, 0,3 mikrona kadar olan serbest altını % 96 verimle kazanmıştır

Tao ve diğ. (2006), ince kömürlerden geliştirilmiş gravite ayırıcıları ile sülfür uzaklaştırma çalışmalarını Box-Behnken tasarımı ile tasarladıkları deney programına göre Falcon SB ayırıcısı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri modellerin uyumluluklarını ANOVA testi le buldukları  $R^2$ , f, Prob>F değerlerine göre araştırmışlar ve daha sonra da Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile bağımsız değişkenlerin davranışlarını ve zenginleştirmeye etkilerini incelemişlerdir.

Zhao ve diğ. (2006) 74 mikron altındaki devre kartlarından geliştirilmiş gravite ayırması yardımı ile metal kazanımını araştırdıkları bir çalışmada Falcon SB ayırıcısı

kullanmışlardır. Deney setini oluşturmak ve sonuçlarını değerlendirmek için istatistiksel deney tasarım ve analiz programlarından biri olan Design-Expert yazılımını kullanmışlardır. Elde ettikleri modeli ANOVA testi ile kontrol etmiş, F, p,  $R^2$  ve Adj  $R^2$  değerlerine göre uygunluğunu saptamışlardır. 3 boyutlu yanıt yüzeyleri ve 2 boyutlu kontur grafikleri ile bağımsız değişkenlerin birbirleri ve yanıt ile olan ilişkilerini yorumlamışlardır. Optimum sonucu, 40 g/l besleme hızı, 0,01 mpa su basıncı ve 50 Hz dönüş frekansında %76,89 içerik ve %80,77 metal kazanma verimi olarak belirlemişlerdir.

El-Midany ve İbrahim (2011) selestitten kalsiti Falcon SB ayırıcısı kullanarak uzaklaştırmaya çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada, MKT kullanarak bir deney programı oluşturmuşlardır. Deneyler sonucu elde ettikleri modele ANOVA testi uygulayarak uygunluğunu saptamışlardır. Daha sonra kontur grafikleri ile bağımsız değişkenlerin birbirleri ve yanıtları ile ilişkilerini yorumlamışlardır.

Aslan (2007a), çeşitli MGS parametrelerinin kömür zenginleştirmeye etkilerini incelediği bir çalışmada deney setini oluşturmak ve sonuçları değerlendirmek için YY yöntemlerinden MKT metodunu kullanmıştır. Bağımsız değişkenler olarak, tambur hızı, tambur eğimi, yıkama suyu miktarı ve PKO'yu seçmiş ve Minitab 7.1 programını kullanarak bir deney seti oluşturmuştur. Yanıt olarak deneyler sonucunda elde ettiği temiz kömür kül içeriği ve yanabilir verim değerlerini kullanılmıştır. Minitab 7.1 programını kullanarak hem 3 boyutlu grafiklerle değişken parametrelerin zenginleştirmeye etkilerini açıklamış hem de yanıt olarak seçtiği temiz kömür kül içeriği ve yanabilir verim değerleri için modeller üretmiştir. Modellerin gerçekliğini test etmek için  $R^2$ 'lerini hesaplamıştır. Modellerin  $R^2$ 'lerini, temiz kömür kül içeriği için 0,84, yanabilir verim için 0,93 olarak hesaplamıştır. Bu çalışma ile CCRD ve RSM'nin, MGS'nin modellenmesinde başarılı olarak uygulanabileceğini ve bu sayede, kısa zamanda ve en az deney sayısı ile en fazla verinin en ekonomik olarak toplanmasının mümkün olacağını belirtmiştir.

Aslan (2008a) MGS ile yaptığı krom zenginleştirme deneylerini MKT ve YYY kullanarak tasarlamış ve analiz etmiştir. Matlab 7.1 yazılım programı ile ürettikleri modellerin uygunluklarını  $R^2$ 'leri ile test etmiş ve Yanıt yüzeyi grafikleri ile de bağımsız değişkenleri ve zenginleştirmeyi yorumlamışlardır. MKT ile yaptıkları bu çalışmaya benzer olarak Taguchi deney tasarım yöntemi ile de MGS'de krom zenginleştirme prosesi için bazı parametreleri optimize etmeye çalışmışlardır. Aslan



(2008b) bu çalışmasında ürettiği modellerin uygunluklarını ANOVA testi ile kontrol etmiştir.

Oruç ve diğ.(2010) yaptıkları ince boyutlu kömürlerin Falcon SB ve hidrosiklon ile zenginleştirilmesini araştırdıkları bir çalışmada Falcon ve hidrosiklon ile yaptıkları deneylerden elde ettikleri sonuçları bir istatistiksel program olan Minitab 15 ile basit regresyon metodu kullanarak analiz etmişler ve modeller üretmişlerdir. Ürettikleri bu modelleri kullanarak gerçek verileri ile tahmin verilerini karşılaştırmış ve bu modellerin  $R^2$ 'lerini hesaplayarak gerçekliklerini test etmişlerdir. Ürettikleri verim modellerin  $R^2$ 'leri Falcon ayırıcısı için 0,40, hidrosiklon için 0,73 olmuştur.

Özge ve diğ. (2011) MGS ile ince linyit artıklarından temiz kömür elde etmeye yönelik olarak yaptıkları modelleme çalışmalarını, Minitab 15 yazılımı ile tasarladıkları deney programına göre gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri modelleri  $R^2$ 'leri ile test etmişlerdir.

Verilen örnekler haricinde, son yıllarda, ülkemizde cevher hazırlama konularında istatistiksel deney tasarım yöntemlerinin kullanımının arttığı anlaşılmaktadır. Son birkaç yılda yapılan yukarıda belirtilen çalışmalara ek olarak gravite, öğütme ve flotasyon gibi konularda yapılan çalışmalar (Aslan, 2007b, Aslan ve Ünal 2009, Aslan ve diğ., 2008, Celep ve diğ., 2011, Özgen ve diğ., 2009, Aslan ve Cebeci, 2007) bu yöntemlerin bilimsel ve endüstriyel araştırmalar için ne kadar önemli olduğunun anlaşılmasına yardım etmektedir.



### **3. MALZEME ve YÖNTEM**

Bu bölüm, deneysel çalışmalarda kullanılan numuneleri ve özelliklerini, deney tasarımlarını ve analiz yöntemlerini, deneylerde ve elde edilen ürünlerin analizlerinde kullanılan cihazları kapsamaktadır.

#### **3.1 Deneysel Çalışmalara Esas Olan Numuneler ve Özellikleri**

Deneysel çalışmalarda iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan biri Reşadiye-Tokat yöresinden temin edilen bentonit numunesidir. Temin edilen 100 kg civarındaki numune konileme dörtlleme yöntemi ile dört eşit parçaya bölünmüş ve deneyler bu numunelerden rastgele seçilen biri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Diğer malzeme ise suni olarak hazırlanan kömür numuneleridir. Temiz kömür olarak Soma bölgesi kömürlerinin 1,4 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta yüzen ürünü alınmıştır. Kömür kullanılarak yapılan deneyler için iki farklı özellikte numune hazırlanmıştır. İlkini yüksek kül içeren kömür, ikincisini ise yüksek kükürt içeren kömür oluşturmaktadır.

##### **3.1.1 Kil numunesi**

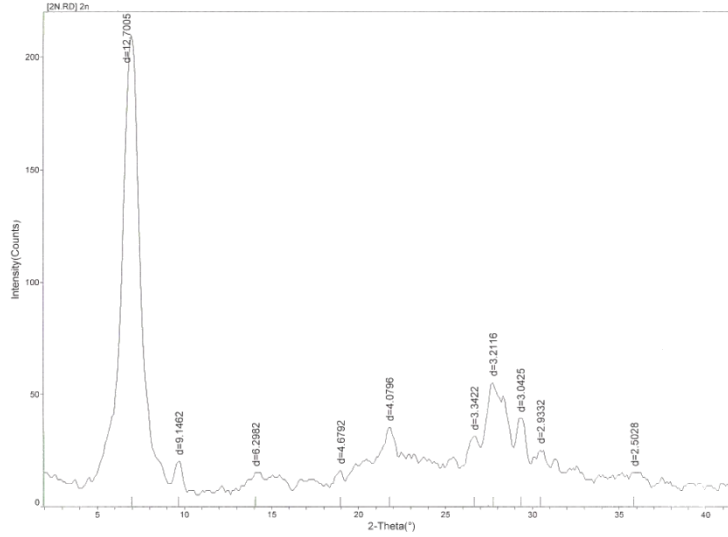
Aynı yoğunlukta, fakat farklı boyutlara sahip minerallerin Falcon ayırıcısındaki davranışlarını ve seçilen bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkilerini incelemek için yapılan deneylerde Reşadiye yöresi bentoniti kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Reşadiye yöresinden alınan bentonit numunesi üzerinde yapılan kimyasal ve mineralojik analizler sonucu, alınan bentonitin Na-Bentonit ve ana mineralinin montmorillonit olduğu anlaşılmıştır. Deneysel çalışmalara temel teşkil eden bentonit numunesinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1'de, XRD sonuçları Şekil 3.1'de verilmiştir (Çinku, 2008).

Yapılan ölçümler sonucunda bentonit numunesinin yoğunluğu 2,36 gr/cm<sup>3</sup> ve rutubeti %10 olarak belirlenmiştir. Kil zenginleştirme deneylerinde kullanılan tüvenan numunelerin KDK değerleri Çizelge A.1'de verilmiştir.

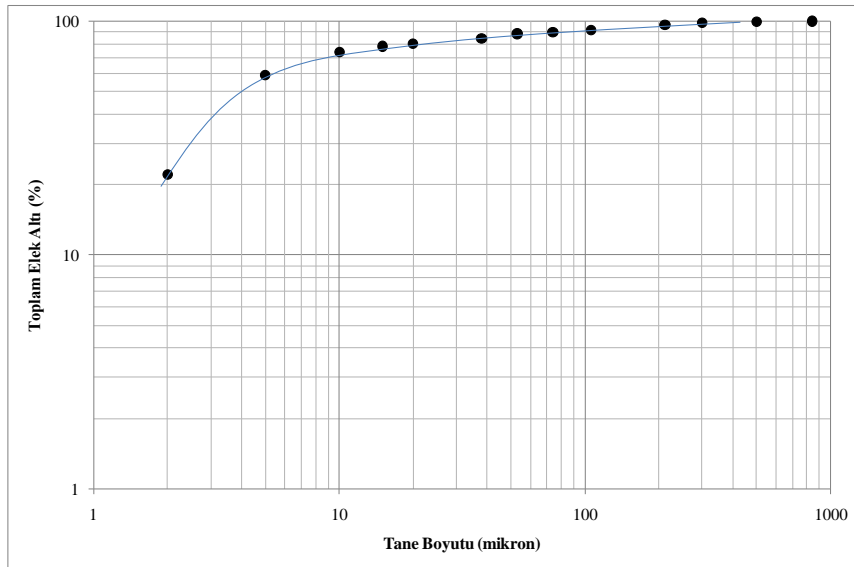
**Çizelge 3.1 :** Deneysel çalışmalarda kullanılan bentonitin kimyasal analiz sonuçları.

Bileşen	Miktar (%)	Bileşen	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	57,09	Na <sub>2</sub> O	2,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,73	K <sub>2</sub> O	0,97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,24	TiO <sub>2</sub>	0,3
MgO	2,03	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15
CaO	3,18	MnO	0,08



**Şekil 3.1 :** Reşadiye bentoniti XRD analiz sonuçları.

Deneyde kullanılan tüvenan numuneye ait elek altı eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



**Şekil 3.2 :** Kil numunesinin tane boyut dağılımı eğrisi.

### 3.1.2 Kömür numuneleri

Farklı yoğunluklardaki malzemelerin Falcon ayırıcısındaki davranışlarını ve seçilen bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkilerini incelemek için yapılan deneylerde

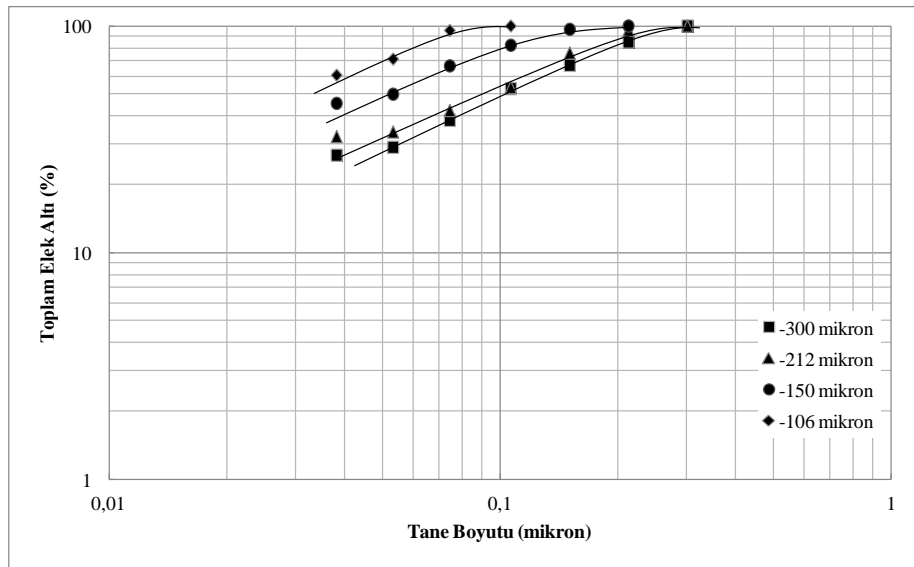
kullanılmak üzere suni numuneler hazırlanmıştır. Kömürdeki külün uzaklaştırılmaya çalışıldığı deneylerde, kül yapıcı olarak kalker kullanılmıştır. Kömürdeki kükürtün uzaklaştırılmasına çalışılan deneylerde ise kömür içerisine saf pirit minerali ilave edilmiştir.

Temiz kömür, Soma bölgesinden temin edilen kömürün 1,4 yoğunlukta yüzen ürünü alınarak elde edilmiştir. Elde edilen numunenin kimyasal analiz değerleri Çizelge Şekil 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2** : Deneylerde kullanılan temiz kömürün kimyasal analiz sonuçları.

Eleman	İçerik
Kül, (%)	10,47
Kükürt, (%)	2,16
Sabit Karbon, (%)	46,23
Uçucu Madde, (%)	42,10
Üst Isıl Değer, (Kcal/kg)	5478

Belirlenen kül içeriklerini (% 10, 20, 30, 40 ve 50) elde etmek için -2 mm’ye kırılmış kömür içerisine gereken oranlarda kalker karıştırılmış ve deneysel çalışmalar için belirlenen tane boyutlarına (-300,- 212, -150, -100, -38 mikron) öğütülmüşlerdir. Farklı boyut ve kül içerikli numunelerin elek altı eğrileri Şekil A.1-A8’de verilmiştir. Farklı kükürt içerikli numuneler ise elde edilen temiz kömürün deneysel çalışmalar için belirlenen tane boyutlarına öğütülmesi ve daha sonra aynı boyutlara öğütülmüş pirit ile karıştırılması sonucu elde edilmiştir. Hazırlanmış numunelerin elek altı eğrileri Şekil 3.3’te toplu olarak verilmiştir.



**Şekil 3.3** : Kükürtlü numunelerin tane boyut dağılım eğrileri.

### 3.2 Yöntem

Bu tez çalışmasında, Falcon ayırıcısında zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonu için yapılan deneylerde kil ve kömür numuneleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar istatistiksel deney tasarım yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı, merkezi kompozit tasarımı ile yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen verilerle zenginleştirmeleri tanımlayan modeller üretilmiştir. Bu modeller yanıt yüzeyi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve optimizasyonu yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile yapılmıştır. Oluşturulan modellerin deneysel verileri ne ölçüde karşıladığı varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Bu yöntemle her bir faktörün yanıtlar üzerindeki istatistiksel önemlilikleri %95 güvenlik seviyesinde Fischer (F) testi uygulanarak bulunmuştur. Model sistemin gerçek cevaba uygun bir yaklaşım olup olmadığına uyum eksikliğinden kaynaklanan hatanın önemsiz ve regresyondan kaynaklanan varyasyonun %95 güvenlik seviyesinde önemli olması koşulu ile karar verilmiştir.

Kil zenginleştirme deneylerinde bağımsız değişkenler olarak G değeri, pülpte katı oranı (PKO), besleme hızı ve besleme miktarı seçilmiştir.

Bilindiği gibi killerin fiziksel özellikleri genellikle değişebilen katyonlara bağlıdır. Bu nedenle kullanım alanları açısından killerin katyon değiştirme kapasiteleri (KDK) büyük önem taşımaktadır. Kil kalitesinin diğer bir göstergesi de  $d_{90}$  boyutudur. Kilin orijinal boyutu 2 mikron olarak tanımlanmıştır ve yapılan tüm kil zenginleştirme işlemlerinde bu değere yaklaşmak esas amaç olmaktadır (Grim, 1968, Grim ve Güven, 1978, Çinku, 2008)

Bu sebeplerden dolayı deneysel çıktı olarak gözlenen yanıt değişkenleri, elde edilen ürünlerin  $d_{90}$  ve katyon değiştirme kapasiteleri (KDK) olmasına karar verilmiştir.

İki bölümden oluşan kömür zenginleştirme deneylerinde ise G, PKO, tane boyutu, besleme hızı ve içerik (kül uzaklaştırma deneyleri için kül içeriği, kükürt uzaklaştırma deneyleri için kükürt içeriği) bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Kül uzaklaştırma deneyleri için seçilen yanıt değişkenleri ısıl değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi, kül uzaklaştırma oranı iken kükürt uzaklaştırma deneyleri için yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma oranı ve ayırma etkinliği seçilmiştir.

Yanıt ve bağımsız değişkenlerin analizleri ANOVA testi, katsayıların anlamlılık testi, regresyon katsayıları, normalite varsayımı ve kalıntıların testleri ile gerçekleştirilmiş, optimizasyon ise kontur eğrileri ile yapılmıştır.

Deney tasarımı, yanıtların analizi, modelleme ve grafiklerin çizimi Minitab® 15 bilgisayar programı ile yapılmıştır.

### **3.2.1 Merkezi kompozit tasarımı (MKT) ile deney tasarımı**

Falcon ayırıcısında zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonu için yapılan deneysel çalışmalar istatistiksel deney tasarım yöntemleri esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Tasarım yöntemi olarak yanıt yüzeyi Yöntemi kullanılmış, deneyler ise merkezi kompozit tasarım tekniği kullanılarak hazırlanmıştır.

Yöntem ve tasarım gereğince ilk önce bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin belirlenmesinde gerek literatür gerekse kişisel gözlemler önemli rol oynamış ve zenginleştirme için en uygun olduğuna inanılan parametreler seçilmiştir.

Bağımsız değişkenlerin adedine ( $k$ ) bağlı olarak deney sayısı ve  $\alpha$  değerleri Çizelge 2.2'den bulunmuştur. Bağımsız değişkenler için en düşük ( $-\beta$ ) ve en yüksek ( $+\beta$ ) sınırlar belirlendikten sonra  $\alpha$ 'nın da yardımı ile düşük (-1), orta (0) ve yüksek (+1) seviyeler hesaplanmıştır (Çizelge 2.3). Bu sayede bağımsız değişkenlerin kod değerlerine karşılık gelen gerçek değerleri hesaplanmıştır.

Kil zenginleştirme için dört (4) bağımsız değişken, kömür deneyleri için ise beş (5) bağımsız değişken seçilmiştir.

#### **3.2.1.1 Kil zenginleştirme deney tasarımı**

Falcon ayırıcısında, kil zenginleştirme deneyleri için dört (4) adet bağımsız değişken seçilmiştir. Bunların, oransal santrifüj kuvvet ( $G$  değeri), pülpte katı oranı, besleme hızı ve besleme miktarı olmasına yapılan literatür çalışmaları ve gözlemler sonucu karar kılınmıştır. Seçilen bağımsız değişkenlerin alt ve üst limitleri Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Yanıt değişkenleri ise zenginleştirme sonrası elde edilen ürünlerin  $d_{90}$  boyutları ve kation değiştirme kapasiteleri (KDK) olarak seçilmiştir.

Merkezi Kompozit Tasarıma göre  $k$  değeri 4 olduğunda denklem (2.17)'den  $\alpha$  değeri 2 olarak bulunur ( $\alpha=2^{k/4} \Rightarrow \alpha=2^{4/4} \Rightarrow \alpha=2$ ). Bu değer, bağımsız değişkenlerin gerçek

değerlerini hesaplamak için gereklidir. Seçilen bağımsız zenginleştirme parametreleri ve seviyeleri ile toplam 31 adet deney belirlenmiştir. Belirlenen bağımsız değişkenler ve seviyeleri Çizelge 3.4’de, bağımsız değişkenlerin kod değerleri ile gerçek değerlerini içeren MKT deney seti Çizelge 3.5’de verilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** Kil zenginleştirme deneyleri bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.

Bağımsız değişkenler	Alt sınır	Üst sınır
G	20	300
PKO (%)	2	10
Besleme Hızı (l/dk.)	1	5
Besleme Miktarı (l)	0,5	3,5

**Çizelge 3.4 :** Kil zenginleştirme deneyleri için bağımsız değişkenler ve seviyeleri.

Değişken Parametre	Sembol	Kodlu Değişken Seviyeleri				
		En Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	En Yüksek
		$-\beta$	-1	0	+1	$+\beta$
G	$x_1$	20	90	160	230	300
PKO (%)	$x_2$	2	4	6	8	10
BH (l/dk.)	$x_3$	1	2	3	4	5
BM (l)	$x_4$	0,5	1,25	2	2,75	3,5

G: Oransal santrifüj kuvvet

PKO: Pülpte katı oranı (%)

BH: Besleme hızı (l/dk.)

BM: Besleme miktarı (l)

### 3.2.1.2 Kömür zenginleştirme deney tasarımı

Falcon ayırıcısı ile yapılan, kömür zenginleştirme deneyleri iki bölümden oluşmaktadır. Birbirine paralel olarak yürütülen deneylerde, yüksek düzeyde kül ve pirit içeren kömürlerin zenginleştirilme olanakları araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda, beşer (5) adet bağımsız değişken seçilmiştir. Seçilen bağımsız değişkenler ve kararlaştırılan alt ve üst sınır değerleri Çizelge 3.6’da gösterilmektedir.

Yanıt değişkenleri ise ısı değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi, uzaklaştırma verimleri (kül uzaklaştırma deneyleri için kül, kükürt uzaklaştırma deneyleri için kükürt uzaklaştırma oranı) ve ayırma etkinliği olarak seçilmiştir.

Merkezi Kompozit Tasarıma göre  $k$  değeri her iki deney seti içinde beş (5) olduğunda denklem (2.17)’den  $\alpha$  değeri 2 olarak bulunur ( $\alpha=2^{k/5-1} \Rightarrow \alpha=2^{4/4} \Rightarrow \alpha=2$ ). Seçilen bağımsız zenginleştirme parametreleri ve seviyeleri ile toplam 31 adet deney belirlenmiştir. Kömür zenginleştirme deneyleri için belirlenen bağımsız değişkenler ve seviyeleri kül içeren kömürler için Çizelge 3.7’de, kükürt içeren kömürler için



Çizelge 3.9’da, merkezi kompozit tasarımı kullanılarak oluşturulan kod değerleri ile gerçek değerleri ise kül içeren kömürler için Çizelge 3.8’de, kükürt içeren kömürler için Çizelge 3.10’da verilmiştir.

**Çizelge 3.5 :** Kil zenginleştirme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar.

Deney No	Bağımsız Değişkenlerin Kod Değerleri				Bağımsız Değişkenlerin Gerçek Değerleri			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)
1	-1	-1	-1	-1	90	4	2	1,25
2	0	0	0	0	160	6	3	2
3	2	0	0	0	300	6	3	2
4	-1	-1	-1	1	90	4	2	2,75
5	0	0	0	2	160	6	3	3,5
6	-1	-1	1	1	90	4	4	2,75
7	1	1	1	1	230	8	4	2,75
8	-1	1	1	1	90	8	4	2,75
9	1	-1	-1	-1	230	4	2	1,25
10	-2	0	0	0	20	6	3	2
11	-1	1	-1	-1	90	8	2	1,25
12	0	0	0	0	160	6	3	2
13	0	2	0	0	160	10	3	2
14	0	0	0	0	160	6	3	2
15	-1	-1	1	-1	90	4	4	1,25
16	1	-1	1	1	230	4	4	2,75
17	0	0	0	0	160	6	3	2
18	0	0	0	0	160	6	3	2
19	-1	1	-1	1	90	8	2	2,75
20	1	1	-1	-1	230	8	2	1,25
21	0	0	0	0	160	6	3	2
22	-1	1	1	-1	90	8	4	1,25
23	0	0	0	-2	160	6	3	0,5
24	0	-2	0	0	160	2	3	2
25	0	0	-2	0	160	6	1	2
26	0	0	2	0	160	6	5	2
27	1	-1	-1	1	230	4	2	2,75
28	1	-1	1	-1	230	4	4	1,25
29	1	1	-1	1	230	8	2	2,75
30	1	1	1	-1	230	8	4	1,25
31	0	0	0	0	160	6	3	2

**Çizelge 3.6 :** Kömür zenginleştirme deneyleri bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.

Kül Uzaklaştırma			Kükürt Uzaklaştırma		
Bağımsız değişkenler	Alt sınır	Üst sınır	Bağımsız değişkenler	Alt sınır	Üst sınır
G	100	300	G	100	300
PKO (%)	5	45	PKO (%)	5	45
Boyut (mikron)	38	300	Boyut (mikron)	38	300
Besleme Hızı (l/dk.)	0,5	3,5	Besleme Hızı (l/dk.)	0,5	3,5
Kül içeriği (%)	10	50	Kükürt içeriği (%)	2	6

**Çizelge 3.7 :** Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.

Değişken Parametre	Sembol	Kodlu Değişken Seviyeleri				
		En Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	En Yüksek
		$-\beta$	-1	0	+1	$+\beta$
G	$x_1$	100	150	200	250	300
PKO (%)	$x_2$	5	15	25	35	45
B (mm)	$x_3$	0,038	0,106	0,150	0,212	0,300
BH (l/dk.)	$x_4$	0,5	1,25	2,0	2,75	3,5
Kİ (%)	$x_5$	10	20	30	40	50

G: Oransal santrifüj kuvvet

PKO: Pülpte Katı Oranı (%)

B: tane boyutu (mm)

BH: Besleme Hızı (l/dk.)

Kİ: Kül içeriği (%)

**Çizelge 3.8 :** Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar.

Deney No	Bağımsız Değişkenlerin Kod Değerleri					Bağımsız Değişkenlerin Gerçek Değerleri				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	G	PKO (%)	B (mm)	BH (l/dk.)	Kİ (%)
1	1	1	-1	1	-1	250	15	0,212	1,25	40
2	1	0	0	-2	0	200	25	0,038	2,00	30
3	1	0	0	0	2	200	25	0,150	3,50	30
4	1	1	1	1	-1	250	35	0,212	1,25	20
5	1	-1	1	-1	-1	150	35	0,106	1,25	20
6	1	0	2	0	0	200	45	0,150	2,00	30
7	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
8	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	50
9	1	-1	1	1	-1	150	35	0,212	1,25	40
10	1	0	0	2	0	200	25	0,300	2,00	30
11	1	-1	1	1	1	150	35	0,212	2,75	20
12	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
13	1	1	1	1	1	250	35	0,212	2,75	40
14	1	-1	-1	-1	-1	150	15	0,106	1,25	40
15	1	1	1	-1	-1	250	35	0,106	1,25	40
16	1	1	-1	-1	-1	250	15	0,106	1,25	20
17	1	1	-1	-1	1	250	15	0,106	2,75	40
18	1	-1	-1	-1	1	150	15	0,106	2,75	20
19	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	10
20	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
21	1	0	0	0	-2	200	25	0,150	0,50	30
22	1	-1	-1	1	1	150	15	0,212	2,75	40
23	1	-1	1	-1	1	150	35	0,106	2,75	40
24	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
25	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
26	1	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	30
27	1	0	-2	0	0	200	5	0,150	2,00	30
28	1	-2	0	0	0	100	25	0,150	2,00	30
29	1	1	1	-1	1	250	35	0,106	2,75	20
30	1	2	0	0	0	300	25	0,150	2,00	30
31	1	-1	-1	1	-1	150	15	0,212	1,25	20
32	1	1	-1	1	1	250	15	0,212	2,75	20

**Çizelge 3.9 :** Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için bağımsız değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri.

Değişken Parametre	Sembol	Kodlu Değişken Seviyeleri				
		En Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	En Yüksek
		$-\beta$	-1	0	+1	$+\beta$
G	$x_1$	100	150	200	250	300
PKO (%)	$x_2$	5	15	25	35	45
B (mm)	$x_3$	0,038	0,106	0,150	0,212	0,300
BH (l/dk.)	$x_4$	0,50	1,25	2,00	2,75	3,50
Sİ	$x_5$	2	3	4	5	6

G: Oransal santrifüj kuvvet  
B: tane boyutu (mm)

PKO: Pülpte Katı Oranı (%)  
BH: Besleme Hızı (l/dk.)

Sİ: Kükürt içeriği (%)

**Çizelge 3.10 :** Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri için kodlu ve gerçek deneysel koşullar.

Deney No	Bağımsız Değişkenlerin Kod Değerleri					Bağımsız Değişkenlerin Gerçek Değerleri				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	G	PKO (%)	B ( $\mu$ m)	BH (l/dk.)	Sİ (%)
1	1	1	-1	1	-1	250	35	0,106	2,75	3
2	2	0	0	0	0	300	25	0,150	2,00	4
3	1	1	1	-1	-1	250	35	0,212	1,25	3
4	1	-1	1	1	-1	250	15	0,212	2,75	3
5	1	1	1	1	1	250	35	0,212	2,75	5
6	-1	1	-1	-1	-1	150	35	0,106	1,25	3
7	1	-1	-1	-1	-1	250	15	0,106	1,25	3
8	0	0	2	0	0	200	25	0,300	2,00	4
9	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
10	0	0	0	2	0	200	25	0,150	3,50	4
11	-1	1	1	1	-1	150	35	0,212	2,75	3
12	0	0	0	0	-2	200	25	0,150	2,00	2
13	-1	-1	-1	1	-1	150	15	0,106	2,75	3
14	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
15	-1	-1	1	-1	-1	150	15	0,212	1,25	3
16	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
17	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
18	1	-1	1	-1	1	250	15	0,212	1,25	5
19	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
20	0	0	0	0	0	200	25	0,150	2,00	4
21	-1	-1	1	1	1	150	15	0,212	2,75	5
22	1	-1	-1	1	1	250	15	0,106	2,75	5
23	0	0	0	-2	0	200	25	0,150	0,50	4
24	0	0	-2	0	0	200	25	0,038	2,00	4
25	1	1	-1	-1	1	250	35	0,106	1,25	5
26	0	2	0	0	0	200	45	0,150	2,00	4
27	-1	1	1	-1	1	150	35	0,212	1,25	5
28	-1	1	-1	1	1	150	35	0,106	2,75	5
29	-2	0	0	0	0	100	25	0,150	2,00	4
30	-1	-1	-1	-1	1	150	15	0,106	1,25	5
31	0	-2	0	0	0	200	5	0,150	2,00	4
32	0	0	0	0	2	200	25	0,150	2,00	6

### 3.2.2 Yüzey yanıt yöntemi analizi

Merkezi Kompozit Tasarıma göre tasarlanarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen yanıtlara göre modeller türetilir. Bu model denklemleri, denklem (2.14) şeklindedir. Elde edilen modellerin sistemi tanımlayıp tanımlamadığı çeşitli yöntemlerle analiz edilir.

İlk olarak, genel bir izlenim edinmek için, model katsayılarını incelenebilir. Kodlanmış deneylere göre gerçekleştirilen deneylerde bağımsız değişkenlerin önündeki katsayılar, bu değişkenlerin zenginleştirme üzerine etkileri hakkında fikir edinilmesini sağlar. Katsayıların mutlak değerlerinin büyüklüğü gösterdikleri etkinin kuvvetini belirtirken, katsayı önündeki “+” ve “-“ işaretleri ise etkinin pozitif yada negatif olduğunu ifade etmektedir.

Regresyon modeli üzerine yapılan analizler ise ayrıntılı olarak sonraki bölümlerde verilmiştir.

#### 3.2.2.1 Varyans analizi (ANOVA)

Varyans analizi özellikle çok parametrelili ve çok seviyeli modellerde kullanılan bir analizdir ve deney sonuçlarının tamamının toplu olarak yorumlanmasını sağlar. Kısaca ANOVA analizi olarak da bilinen varyans analizi, istatistiksel tekniklerin genel toplamıdır; nicel ölçümleri kapsayan deneysel verilerin analizi ve elde edilen model hakkında karar vermek için geliştirilmiş bir tekniktir.

Varyans analizi iki veya daha fazla ortalama arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezi test etmek için kullanılır. Varyans analizinin uygulanabilmesi için örneklerin seçildiği ana kütlelerin normal dağılması ve varyanslarının eşit olması gerekmektedir. Kısaca yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığını test etmek amacı ile yapılan testlerdir (Kuehl, 2000, Kasapoğlu, 2007).

Varyans analizlerinden elde edilen önem seviyesi (anlamlılık düzeyi), testler sonucunda verilen kararın doğruluğunun ne kadar olasılıkla güvenli olduğunu belirler. Genellikle  $\alpha$  ile gösterilen bu ihtimal, çoğu zaman örneklerin alınmasından önce tayin edilir. Böylece, elde edilen sonuçların yapılan seçimden etkilenmemesi sağlanmış olur. Uygulamada daha çok 0,05 ve 0,01 önem seviyeleri kullanılır (Ryan, 2000). Bir hipotez testinde örneğin 0,05 (veya %5) önem seviyesi esas alındığında,

hipotezin kabul edilebileceği halde reddedilme olasılığı yüzde 5 civarındadır. Yani test sonunda verilen kararın doğruluğu % 95 güvenli bulunabilir. Bunun anlamı, hata yapma olasılığının %5 olduğudur (Kuehl, 2000, Bektaş, 2006).

ANOVA çizelgesinde, modele ait kareler ortalamasının hata kareler ortalamasına oranı olan F oranı hesaplanır. Kurulan modele ait keyfi bir anlamlılık düzeyi ( $\alpha$ ) seçilir ve hesaplanan F değeri, belirlenen anlamlılık düzeylerine göre hazırlanmış F çizelgelerinde serbestlik derecelerinin kesişim noktasında bulunan  $F_{\alpha(f_3, f_2)}$  oranı değerleri ile kıyaslanır. Modelin geçerli olabilmesi için  $F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{çizelge}}$  şartını sağlaması gerekir ve bu durumda kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilir (Kuehl, 2000, Montgomery, 2005).

Çoklu regresyon analizinin anlamlılık testinde kullanılan varyans analizi (ANOVA) bileşenleri Çizelge 3.11’de verilmiştir. Burada,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  serbestlik derecesi, SSM modelin kareler toplamını, SSE hatanın kareler toplamını, SST model ve hatanın kareler toplamını, MSM model karelerinin oranını, MSE ise hata karelerinin oranını göstermektedir.

**Çizelge 3.11 : ANOVA tablosu.**

Varyasyon Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F
Model (Regresyon)	$f_3$	SSM	$\frac{MSM}{\left(\frac{SSM}{f_3}\right)}$	$\frac{MSM}{MSE}$
Hata	$f_3$	SSE	$\frac{MSE}{\left(\frac{SSE}{f_2}\right)}$	
Toplam	$f_3$	SST		

### 3.2.2.2 Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri

Regresyon (model) katsayılarının tek tek anlamlılığının test edilmesindeki amaç her bir model katsayısının model içinde ne kadar önemli olduğunun test edilmesidir. P değeri ya da olasılık değerinin hesaplanmasını da kapsar. Hesaplanan Prob.>F değeri istenen olasılıkla yani  $\alpha$ , önem seviyesi (anlamlılık düzeyi) ile karşılaştırılır (Kul, 2004).

Modelin deneysel veriyi gerçekten tanımlayıp tanımlamadığının kontrolleri yapılmalıdır. İyi bir modelin yanıtta değişimin tümünü açıklaması gerekir. Regresyon katsayısı da bu kriter için bir ölçüdür ve model tarafından hesaplanan değişimin toplam değişime bölünmesi ile hesaplanır.  $R^2$  katsayısı 0 ile 1 arasında değer alır.  $R^2$  değeri birle yaklaştıkça gözlenen ve model sonucu bulunan değerler arasındaki ilişkinin iyi olduğu söylenebilir.  $R^2$  değeri ANOVA modeli tarafından saptanan değişkenlik oranıdır. Düzeltilmiş  $R^2$  ise modeldeki faktör sayılarının etkisini inceleyen bir istatistiki değerdir. Regresyon katsayısı  $R^2$  toplam değişimin ne kadarlık kısmının model tarafından açıklandığını söyler. Gözlenen ve model sonucu bulunan değerler arasındaki ilişkinin iyi olmasının yani  $R^2$  değerinin yüksek olması istenir. Düzeltilmiş Adj  $R^2$  değerinin de yüksek olması bu savı destekler.

Modelin uygunluğunun test edilmesinde bakılacak diğer bir parametre de korelasyon katsayısıdır. Korelasyon katsayısı, değişkenlerin yönü ve etkileşimlerin nasıl olduğu hakkında bilgi verir. Değişkenler arasında etkileşimin olup olmadığı, varsa etkileşimin kuvvetli olup olmadığı gözlenebilir. Diğer yandan, korelasyon katsayısıyla sebep-sonuç ilişkisi saptanamaz. Korelasyon katsayısı ( $R$ ), modelden elde edilen değerlerin ve deneysel değerlerin, deneysel sonuçların ortalama değerinden uzaklaşma derecesini verir.  $R$  değeri +1 ile -1 arasında değişmektedir.  $R$ 'nin +1 olması değişkenler arasında pozitif tam doğrusal ilişkinin varlığını ortaya koyar; -1 olması durumunda ise negatif tam doğrusal ilişki söz konusudur.  $R$ 'nin sıfıra yaklaşması doğrusal bir ilişkinin olmadığını gösterir (Collins, 1999).

Bu katsayılardan başka, PRESS ise karelerin toplamalarının tahmin hatasını verir. Modelin yeni deneydeki çıktıları ne kadar iyi tahminleyebileceğini söyler. PRESS'in düşük değerleri tercih edilir (Montgomery, 2005, s: 98, 1997, 104).

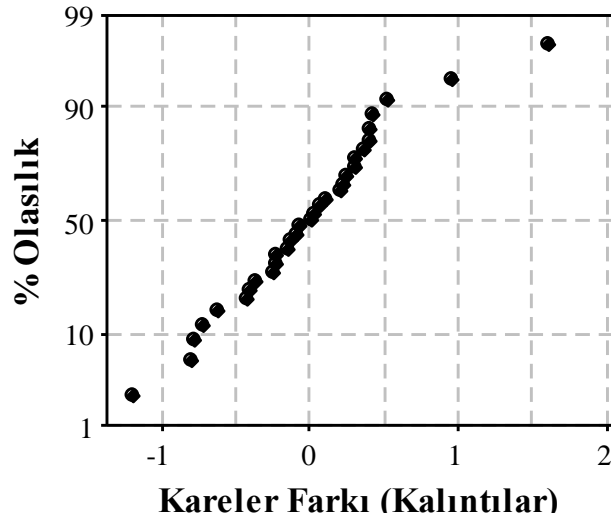
### **3.2.2.3 Model uygunluk testleri**

Katsayıların test edilmesi modelin uygunluğunu tanımlamada yeterli değildir. Bu testlere ek olarak modelin uygunluğu kalıntılarının (residual) incelenmesi ile yapılır. Bu kalıntılar gözlenen çıktılar ve tahminlenen çıktılar arasındaki farktır. Çıktıların normal olasılık dağılımları yolu ile ve kalıntılarının tahminlenen çıktılarına karşı grafikleri yardımıyla bulunur. Eğer model uygunsa normal olasılık diyagramlarındaki kalıntılarının noktaları, düz bir çizgi oluşturmak zorundadırlar. Diğer bir taraftan

kalıntıların tahminlenen çıktılarına karşı plot diyagramları, belli bir yapıda olmamalı, dağınık olmalıdır.

### Normalite Varsayımı

Normalite varsayımının kontrolü kalıntıların histogramının çizilmesi ile yapılabilir (Şekil 3.4). Eğer hataların  $N(0, \sigma^2)$  varsayımı sağlanıyorsa bu çizim merkezi sıfır olan bir normal dağılımdan bir örnek gibi görülecektir. Küçük örneklerde belirgin dalgalanmalar oluşabilir, bu da histogramın şeklini az da olsa değiştirebilirse de normallikten sapma olarak adlandırılmaz ancak normallikten ciddi olarak saptalara önem verilmeli ve daha detaylı incelemeler yapılmalıdır.

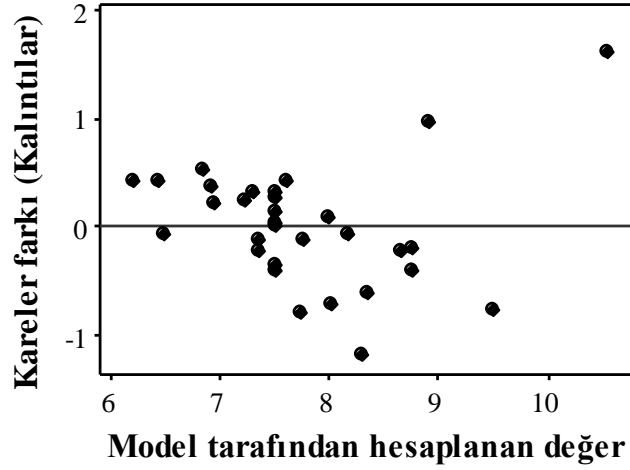


Şekil 3.4 : Kalıntıların normal olasılık dağılımı.

Kalıntıların normal olasılık diyagramları çok yararlı bir prosedürdür. Varyans analizinde kalıntıların kullanılması daha etkindir. Eğer örneğin hata dağılımı normal ise bu diyagram düz bir çizgiyi andıracaktır. Bu düz çizginin incelenmesinde uç değerlerden çok merkezdekilere önem verilecektir (Montgomery, 1997, s.78).

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

Eğer model doğru ve varsayımlar sağlanmışsa kalıntılar belli bir yapıyı takip etmemelidirler, diğer bir değişkene ve tahmin edilen yanıtına bağlı olmamalıdır. Bunun en basit kontrolü kalıntıların model değerlerine (fitted values) karşı grafiğinin çizilmesidir (Şekil 3.5). Burada gözlenebilecek en önemli durum, sabit olmayan varyanstır. Bazı durumlarda gözlem değerleri arttıkça gözlemlerin varyansı da artabilir. Bu da ölçüm aletlerinden kaynaklanan bir hatadan kaynaklanabilir. (Montgomery, 1997, s.80)



**Şekil 3.5 :** Hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### **Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi**

Kalıntıların veri toplamanın zaman sıralamasına göre çizilmesi kalıntılar arasında korelasyon olup olmadığının anlaşılmasında fayda sağlar. Kalıntıların negatif ya da pozitif çıkma eğilimi, hataların bağımsızlığı ilkesinin ihlali konusunda bilgi verir (Şekil 3.6). Bu ciddi bir problemdir, düzeltilmesi güçtür ve veri toplanması sırasında bu problemin ortaya çıkması engellenmelidir. Deney süresince deney yapan kişiler ve becerileri değişebilir, ya da çalışan proses bir yöne eğilimli ya da düzensiz hale gelebilir. Bu durum hata varyansının zaman içinde değişmesine neden olur. Bu da kalıntıların bir uçta diğerinden daha fazla yayılması ile kendini gösterir (Montgomery, 1997, s.79).

### **3.2.2.4 Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile deneylerin analizi**

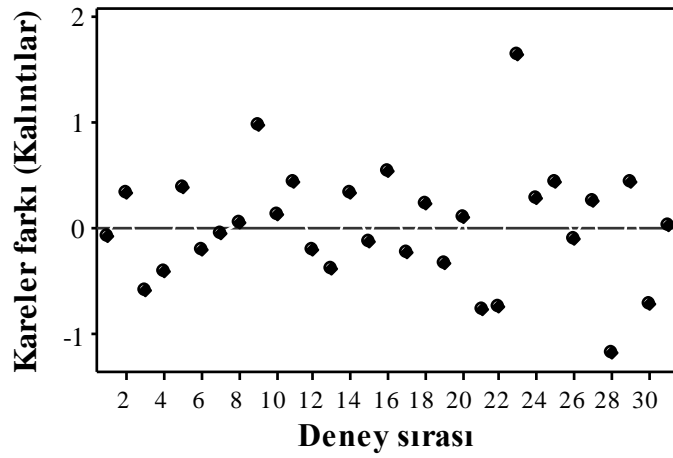
Merkezi kompozit tasarım ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen modeller ikinci dereceden yanıt yüzeyi modeli olarak adlandırılırlar ve ikinci dereceden yanıt yüzeyleri analizlerinin kullanılması gerekir. Analizler iki (kontur grafiği) ve üç boyutlu (yanıt yüzeyi grafiği) grafikler çizilerek yapılır.

Yanıt yüzeyi grafiği, ikiden fazla faktörün düzeylerinin yanıt değişkeni üzerine etkisinin üç boyutlu olarak gösteriminde kullanılan grafiklerdir. Eğer ikiden fazla faktör varsa diğer faktörlerin düzeyleri sabitlenerek asıl ilgilenilen faktörlerin değerlerini görmek de mümkündür.

Kontur grafiği yanıt yüzeyi yöntemlerinin sonuçlarını en iyi şekilde ortaya koyan grafiklerden birisidir. X ve Y eksenlerinde faktörler yer alırken eksenlerin içinde kalan bölgeler ise yanıt yüzeyinin aldıkları değerleri gösterir. Yanıt yüzeyi grafiğine



benzer olarak, eğer üçüncü veya daha fazla faktör varsa düzeyi sabitlenerek grafiğe eklenebilir.



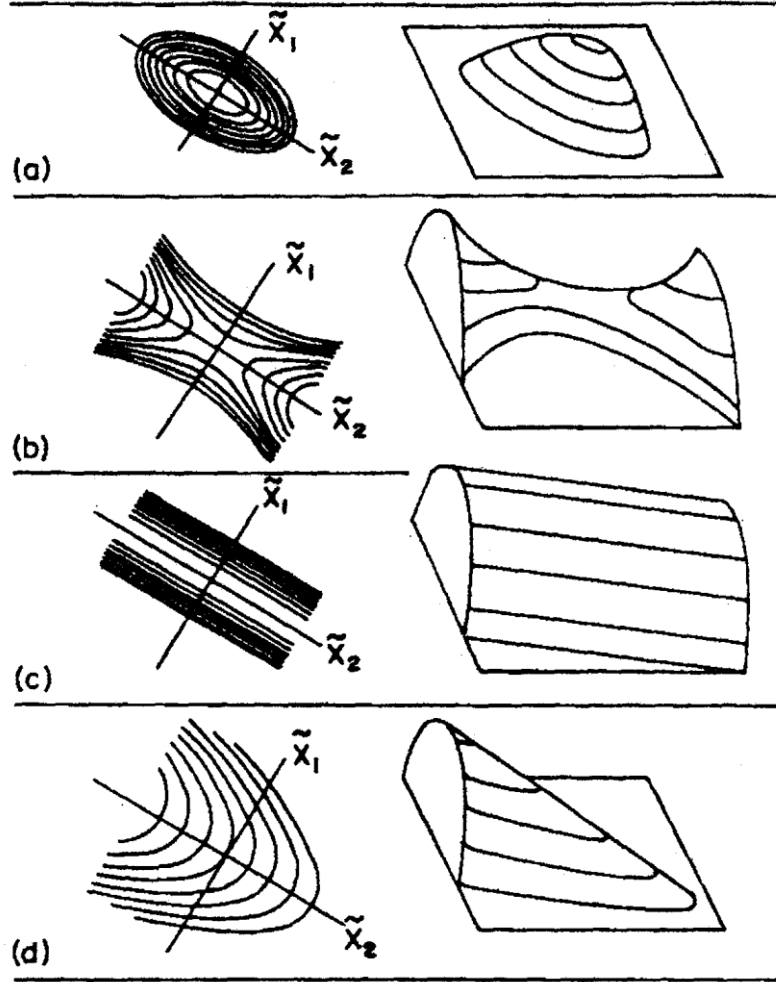
Şekil 3.6 : Kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, deney değişkenlerinin farklı değerleri için cevabı tahmin etmede oldukça yararlıdır. Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri bağımsız değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer iki değerin sabit tutulduğu koşullar için çizilir. Örneğin G, PKO, BH ve BM bağımsız değişkenlerimiz olsun. G ve PKO ya göre çizilecek olan yanıt yüzeyi ve kontur grafiği BH ve BM'nin sabit tutulduğu değerler için G ve PKO'nun  $f(G,PKO)$  şeklindeki fonksiyonu olarak çizilir.

Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, katsayılarla bağlı olarak maksimum nokta ya da minimum nokta (eliptik yada dairesel) (Şekil 3.7 (a)), eyer nokta (minimaks) (Şekil 3.7 (b)), durağan sırt (Şekil 3.7 (c)), artan/azalan sırt (Şekil 3.7 (d)) durumunda olabilir. Eğriler çizilirken durağan noktanın yeri de Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerinin yorumlanmasında önemlidir. Bu modellerde bağımlı değişkenin maksimum veya minimum değerini aldığı nokta “durağan nokta” olarak adlandırılır. Bu nokta elipsler şeklinde gösterilen sistemin merkezinde yer alır. Bazı durumlarda ise merkezde yer alan durağan nokta ne maksimum ne de minimum değeri gösterir. Bu durumda durağan nokta eyer noktası olarak, sistem ise eyer sistemi olarak adlandırılır. Durağan noktaların belirlenmesi ikinci dereceden yanıt yüzeyleri yönteminde en önemli noktalardan biridir. Grafikler (yanıt yüzeyi ve kontur grafiği) bu noktaların belirlenmesinde yardımcı olurlar (Şekil 3.7).

Yanıt yüzeyinin dairesel olması değişkenler arasındaki iç-etkileşimin ihmal edilebilir olduğunu gösterebilir. Elips ya da eyer şeklindeki yüzeyler iç-etkileşimlerin önemli

olduğunu gösterir. Durağan veya artan/azalan sırt şeklindeki yüzeyler ise durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını, seçilen değişkenlerden birinin etkisinin olmadığını gösterir. (Box et al. 1978, Khuri ve Cornell 1987, Montgomery, 2009).



Şekil 3.7 : Yanıt yüzeyi ve kontur grafiği.

### 3.2.3 Optimizasyon

#### 3.2.3.1 Yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ile optimizasyon

Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerinden, yanıtlar için en uygun aralıklar tespit edilir. Elde edilen değerler model denkleminde yerine konarak yanıtların alacağı değerler hesaplanır. En uygun sonucu veren deney şartları optimum sonuç olarak kabul edilir.

#### 3.2.3.2 Kritik noktanın hesaplanması ile optimizasyon

Optimizasyon için model denkleminde, yanıt yüzeyi üzerindeki kritik noktanın yeri araştırılır. Matematiksel olarak bir fonksiyonun kritik noktası o fonksiyonun

maksimum veya minimum noktasıdır. Fonksiyonun bağlı olduğu değişkenlere göre birinci türevinin sıfıra (0) eşitlenmesi ile bulunur. Eğer fonksiyon birden çok değişkene bağlı ise her bir değişken için ayrı ayrı kısmi türev alınarak sıfıra (0) eşitlenir **(3.1)**.

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = \beta_1 + 2\beta_{11}X_1 + \beta_{12}X_2 = 0$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_2} = \beta_2 + 2\beta_{22}X_2 + \beta_{12}X_1 = 0$$
**(3.1)**

Birinci türevlerin sıfıra eşitlenmesi ile  $n$  bağımsız değişken için  $n$  adet birbirinden bağımsız lineer denklem bulunur. Bu denklem sistemi çözülerek  $x_1, x_2, \dots, x_n$  bağımsız değişkenlerinin kritik nokta için değerleri bulunur ve fonksiyonda yerine koyularak optimum nokta bulunur. Elde edilen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  değerleri optimum şartların kodlu değerleridir ve denklem **(3.2)** ile gerçek değerleri bulunur.

$$X_i = \frac{P_i - P_{i0}}{r_i}$$
**(3.2)**

Burada,  $X_i$  parametrenin kodlanmış seviye değeri,  $P_i$  parametrenin çalışma değeri,  $P_{i0}$  parametrenin merkez nokta değeri,  $r_i$  parametrenin çalışma aralığının seviye aralığına eşit olarak bölünmesiyle bulunan değerdir.

### **3.2.3.3 Örtüşen kontur grafiği yardımı ile optimizasyon**

Daha önce bahsedildiği gibi, kontur grafikleri, seçilen iki bağımsız değişkenin diğer değişkenlerin sabit tutulduğu koşullarda yanıt değişkenleri ile nasıl bir ilişkilerinin olduğunu gösterir. Örtüşen kontur grafiği ise birçok yanıt değişkeni için kontur grafiği çizmek ve tek bir grafikte birden fazla kontur grafiğini birbirlerinin üstüne bindirerek için kullanılır. Bu sayede, yanıt değişkenlerinin belirlenen değerlerini elde etmek için gereken optimum bağımsız değişken koşulları bulunur.

Grafikte olması istenen yanıt değişkenleri seçilir ve alt/üst sınırları girilir. Bağımsız değişkenlerin koşulları girilir ve grafikler incelenmek istenen bağımsız değişkenlerin fonksiyonları olarak diğer bağımsız değişkenlerin sabit tutulduğu koşullar için çizdirilir elde edilen grafiklerden seçilen yanıt değişkenleri için çalışma aralıkları belirlenir.

### 3.2.3.4 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile modelleme

Çekicilik (desirability) fonksiyonu yaklaşımı çok yanıtli optimizasyon problemlerinde, yanıtların eş zamanlı optimize edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Çekicilik fonksiyonu, tüm yanıtların, tek bir fonksiyon altında toplanmasını ve bu fonksiyonun arzu edilen sonuçları verecek şekilde maksimize edilmesini içermektedir. Desirability fonksiyonu, tüm yanıtların bir araya getirildiği, 0 ile 1 arasında değişen tek bir yanıt indeksidir ve bu değer 1'e yaklaşması araştırmacının belirlediği kriterlerin sağlandığını belirtmektedir.

Desirability fonksiyonu,  $i$  adet yanıt değişkeni bulunan bir durumda, her bir tahminleşmiş yanıt değişkeni  $Y$ 'yi, bir çekicilik değeri  $d_i$ 'ye dönüştürmektedir. Desirability fonksiyonu  $d_i(Y)$ 'ler her bir yanıt ( $Y$ ) için ayrı ayrı hesaplanır ve daha sonra bu bireysel fonksiyonların geometrik ortalaması alınarak tek bir toplu desirability fonksiyonu ( $D$ ) oluşturulur. Optimizasyon çalışmasında her bir yanıt için seçilen kritere (maksimum, minimum, hedef değer atanması veya belli bir aralıkta olması) bağlı olarak farklı desirability fonksiyonları kullanılmaktadır.

$$d_i(Y) = \begin{cases} 0 & Y < L \\ \left(\frac{Y-L}{T-L}\right) & L \leq Y \leq T \\ \left(\frac{U-Y}{U-T}\right) & T \leq Y \leq U \\ 0 & Y > U \end{cases} \quad (3.3)$$

Burada,  $T$ , hedef değeri,  $L$  ve  $U$  sırasıyla alt ve üst sınırları belirtmektedir.

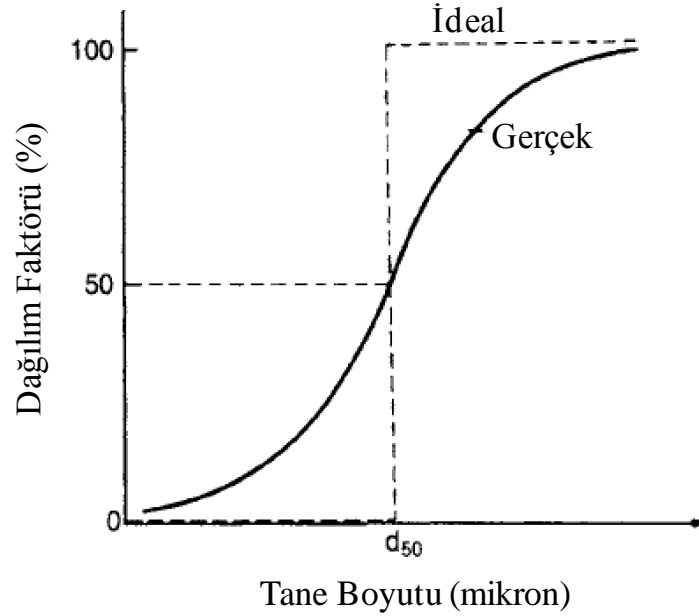
Her bir yanıt için desirability fonksiyonları tanımlandıktan sonra geometrik ortalamaları alınarak hepsi için tek bir toplu desirability fonksiyonu ( $D$ ) elde edilir. İlave olarak her bir yanıtın optimizasyondaki önemliliğini belirten 1'den 5'e kadar önemlilik derecesi ( $I$ ) de verilebilmektedir. Son toplu desirability fonksiyonu  $i$  adet yanıt için,

$$D = (d_1^{I_1} * d_2^{I_2} * \dots * d_n^{I_n})^{1/(I_1+I_2+\dots+I_n)} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir (3.4). Daha sonra toplu desirability fonksiyonunu maksimize eden ( $\mathbf{x}$ ) değişken seviyesi kombinasyonu bulunur (14).

### 3.2.4 Ayırma boyutuna göre değerlendirme

Boyuta göre sınıflandırarak zenginleştirme yapan cihazlarda ayırma etkinliğinin belirlenmesinde en çok Tromp eğrisi, diğer adları ile performans veya dağılım eğrisinden yararlanılmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Tromp eğrisi.

Bu eğri, beslenen malzeme içindeki her boyut grubundaki malzeme ağırlığının, alt veya üst akıma geçen malzeme ağırlığına oranlanması ile bulunan dağılım faktörü ve boyut gruplarına göre çizilir ve beslenen malzeme içindeki her tane boyutunun ayırma sonunda alt veya üst akıma geçen yüzde oranını gösterir.

Boyuta göre sınıflandırarak zenginleştirme yapan cihazların ayırma boyutu veya kesme boyutu, besleme içindeki tanelerin % 50'sinin alt veya üst akıma geçtiği boyut olarak kabul edilir. Bu boyuttaki taneler hem üst akıma hem de alt akıma aynı oranda gitme şansına sahiptirler. Bu nokta d<sub>50</sub> olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.8'de iki eğri görülmektedir. Kesikli olarak çizilmiş olan eğri "ideal eğri"dir. Bu eğri d<sub>50</sub> boyutundan büyük tanelerin tamamının alt akımdan, küçük tanelerin tamamının da üst akımdan alındığını ve birinden diğerine bir karışma olmadığını gösterir. Boyuta göre sınıflandırarak zenginleştirme yapan cihazlardan ideal olarak böyle bir ayırma beklenir. Ama pratikte durum bundan farklı olup düz olarak çizilmiş olan "gerçek eğri"deki gibidir. Bu eğri d<sub>50</sub> boyutundan büyük tanelerin tamamının alt akımdan, d<sub>50</sub> boyutundan küçük tanelerin de tamamının üst akımdan alınmadığını, birinden

diğerine karışmaların olduğu durumu göstermektedir. Pratikte boyuta göre sınıflandırarak zenginleştirme yapan cihazlarda karşılaşılan durum bu şekildedir.

Kesme boyutunun keskinliği yani ayırma hassasiyeti, ayırım eğrisinin merkezinin eğimine bağlıdır ve eğim dikleştikçe verim de aynı oranda artmaktadır. Eğrinin eğimi, aynı zamanda, % 75 ve % 25 oranlarında alt akıma giden malzemenin boyutlarından da çıkarılabilir. Bu oranlar,  $d_{75}$  ve  $d_{25}$  olarak da bilinmektedirler. Ayırmanın verimi veya hassasiyeti (I) aşığıdaki formülle verilir (3.5).

$$I = (d_{75} - d_{25}) / 2d_{50} \quad (3.5)$$

I değeri ne kadar küçükse ayırmanın yapıldığı cihazın ayırma performansının o kadar yüksek olduğunu gösterir (Wills ve Napier-Munn, 2006, Ateşok, 2009).

Ayırma performansının diğer bir göstergesi de, ideal eğri ile gerçek eğri arasındaki alanlardır. İnce tane boyutuna göre çizilen ayırma eğrisinde,  $d_{50}$  ayırma boyutu olarak alınır, üst bölümdeki alanın büyüklüğü iri malzemedeki ince malzeme kaçağını, alt bölümdeki alanın büyüklüğü ise ince malzemeye karışan iri malzeme kaçağını gösterir.

### 3.3 Techizat

#### 3.3.1 Kil deneylerinde kullanılan analiz yöntemleri ve cihazları

Tüvenan numune ve deneylerinden elde edilen konsantre ve artıkların tane boyut dağılımı analizleri, 0.3-300 mikron arasında ölçüm yapan FRITSCHE Analysette 22 COMPACT tane boyutu ölçüm cihazı ile yaşı olarak yapılmıştır (Şekil 3.9). Ürünlerin karakterizasyonunda, kil minerallerinin oldukça ince tane boyutlarına sahip olması dikkate alınarak bu cihaz tercih edilmiş olup, ürünlerin  $d_{90}$  ve  $d_{50}$  boyutlarına göre değerlendirme yapılmıştır.

Bentonit numunesinin yoğunluk ölçümü Micromeritics 1340 marka piknometre kullanılarak (Şekil 3.10), nem tayini ise halojen kurutucu ile gerçekleştirilmiş (Şekil 3.11).



Şekil 3.9 : Fritsch tane boyutu ölçüm cihazı.



Şekil 3.10 : Micromeritics 1340 piknometre.

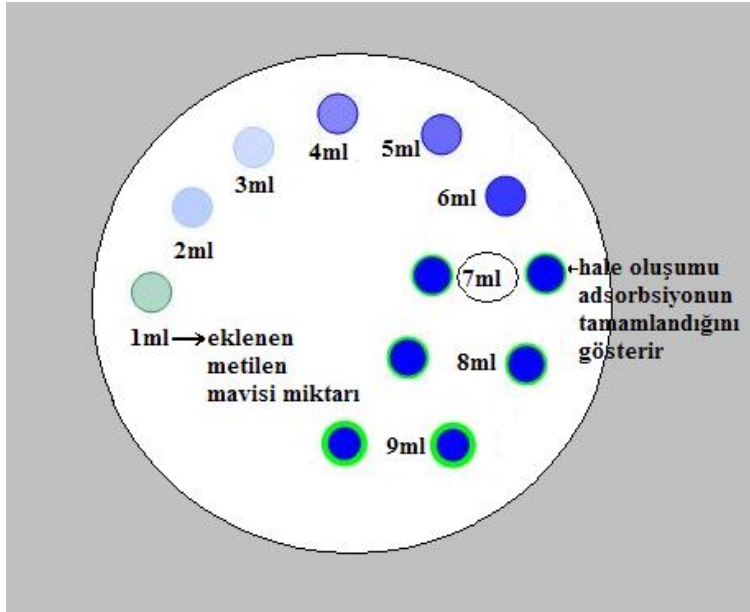


Şekil 3.11 : Precisa halojen kurutucu.

Deneysel çalışmalar esnasında da kolay ve pratik bir yöntem olması nedeniyle kation değişim kapasitesi (KDK) tayini amacıyla metilen mavisi tekniği kullanılmıştır. KDK değeri meq/100gr olarak hesaplanır. Şekil 3.12’de kation değişim kapasitesi düzeneği, Şekil 3.13’te ise bir filtre kağıdı üzerinde gerçekleştirilen metilen mavisi testi (Çinku, 2008) görülmektedir.



Şekil 3.12 : Kation değişim kapasitesi belirleme düzeneği.



Şekil 3.13 : Metilen mavisi testi örneği.

### 3.3.2 Kömür deneylerinde kullanılan analiz yöntemleri ve cihazları

Kömür ile Falcon ayırıcısında yapılan deneylerin sonunda elde edilen konsantre ve artıklara kül, kükürt ve ısı değer analizleri yapılmış, sonuçlar kül uzaklaştırma deneyleri için ısı değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi, kül uzaklaştırma oranı,



kükürt uzaklaştırma deneyleri için yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma verimleri hesaplanarak yapılmıştır. Ayrıca ayırma etkinliklerine (AE) göre de değerlendirilmiştir.

Kömür zenginleştirme işlemleri sonucu elde edilen ürünler öncelikle temiz kömür verimi ve yanabilir verim ile değerlendirilir (Ateşok, 2009). Ayrıca, birçok bağımsız değişkenin aynı anda değiştirilmesi ile yapılan ayırma sonuçlarını, herhangi bir hedef değer olmadığından, birbirleri ile karşılaştırmak için ayırma etkinliği değeri de kullanılır (Honaker ve diğ., 2000, Aslan, 2007a, Aslan ve Cebeci, 2007). Ayırma etkinliği, istenilen ve istenmeyen kısımları birbirinden ayırımındaki başarıyı ifade eden kıstastır ve hangi safsızlığın uzaklaştırılacağına bağlı olarak tanımlanır (3.6). Ayırma etkinliği değeri ne kadar büyük ise daha iyi ayırma performansı sağlanır. Mükemmel bir ayırım için ayırma etkinliği değeri %100 olmalıdır. Genel olarak;

$$AE (\%) = \% \text{ İstenilen Verim} - (100 - \% \text{ uzaklaştırma oranı}) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir (Kawatra ve Eisele, 2001). Burada istenilen verim, temiz üründe kazanılan değerli kısmın toplama oranıdır.

Yüksek küllü kömür zenginleştirme işlemlerinde ayırma etkinliği formülü (3.7);

$$AE (\%) = C100 \left( \frac{(100 - c) - (100 - f)}{(100 - f) f} \right) \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir (Wills ve Napier-Munn, 2006, Kawatra ve Eisele, 2001). Burada;  $C$ , temiz kömür miktarı (%),  $c$ , temiz kömür kül içeriği (%),  $f$  ise tuvenan kömür kül içeriği (%)'dir.

Denklem (3.7) dikkatlice incelenirse, aslında kül uzaklaştırma işlemleri için ayırma etkinliğinin, yan taşı ayrılmış kömür içerisindeki yanabilir kısmın yüzdesini veren yanabilir verim (YV) ile konsantreye kaçan kül yüzdesinin (KKV) ya da toplamdan çıkartılmış kül uzaklaştırma oranının (KUO) farkıdır ve kısaca,

$$AE (\%) = YV - (KKV) \text{ ya da } AE (\%) = YV - (100 - KUO) \quad (3.8)$$

olarak yazılır. KKV ve KUO;

$$KKV (\%) = \frac{C c}{F f} , KUO(\%) = \frac{T t}{F f} \quad (3.9)$$

olarak formüle edilir. Burada,  $F$ , tuvenan kömür miktarı (%),  $T$ , artık miktarı (%),  $t$  ise artık külü (%)’dür.

Aynı şekilde kükürt uzaklaştırma işlemleri için hesaplanan ayırma etkinliğinde de aynı formüller geçerlidir. Tek fark denklem (3.7) de kül içerikleri yerine kükürt içerikleri konularak hesaplanır.

Karbon ve kükürt analizleri ELTRA marka C5580 model karbon-kükürt analiz cihazında (Şekil 3.14), kalorifik değer analizleri ise IKA marka C200 model kalorimetre analiz cihazında yapılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.14 : ELTRA marka C5580 model karbon-kükürt analiz cihazı.



Şekil 3.15 : IKA marka C200 model kalorimetre analiz cihazı.

### 3.3.3 Falcon ayırıcısı

Zenginleştirme deneyleri laboratuvar tipi L40 model Falcon ayırıcısı kullanılarak yapılmıştır. Besleme ünitesi ve Falcon L40 ayırıcısı Şekil 3.16’da, bu ayırıcıya ait özellikler ise Çizelge 3.12’de verilmektedir.



Şekil 3.16 : Laboratuvar ölçekli L40 model Falcon ayırıcısı.

Çizelge 3.12 : Laboratuvar ölçekli L40 model Falcon ayırıcısı spesifikasyonları.

Besleme kapasitesi	0-300 kg/saat katı (malzemeye bağlı)
Maks. Besleme yoğunluğu	Ağırlıkça % 75 katı (tavsiye edilen)
Parça boyutu	-12 mesh (1,7 mm)
Konsantre hacmi	65 ml
Konsantre ağırlığı	0.07-0.15 kg
Konsantratör Gücü	½ HP (360 watt) (giriş-115/230VAC/1/50/60 Hz. )
Santrifüj Alanı	0-300 G
Konsantratör net ağırlığı	32 kg

Falcon ayırıcısında G değeri motor dönüş hızı ile ayarlanmaktadır. Motor hızı ayarı ise ayırıcıya bağlı olan Autopac kontrol sistemi ile sağlanmaktadır. Sisteme girilen

belirli değerlerine karşılık gelen motor hızları, istenilen G değerini sağlamaktadır. Çizelge 3.13'te Falcon L40 ayırıcısındaki G değeri tablosu görülmektedir.

Laboratuar tipi Falcon L40 ayırıcısının endüstride kullanılan Falcon C ayırıcılardan farkı ağır malzemenin çıktığı çıkış oluklarının olmamasıdır.

**Çizelge 3.13 : L40 G tablosu.**

Autopac Hz	Motor (devir/dakika)	Rotor (devir/dakika)	G değeri
20	583	583	20
25	729	729	31
30	875	875	44
35	1021	1021	60
40	1167	1167	78
45	1313	1313	99
50	1458	1458	123
55	1604	1604	148
60	1750	1750	176
46.66	1361	1361	107
52.15	1521	1521	133
55.33	1614	1614	150
59.76	1743	1743	175
63.89	1863	1863	200
67.76	1976	1976	225
71.43	2083	2083	250
74.91	2185	2185	275
78.25	2282	2282	300

Her bir besleme için 2 litrelik beherlerde, istenilen PKO'larda plpler hazırlanmıştır. Bentonit ile yapılan deneylerde, bentonit numunesi ilk olarak 8 saat karıştırma ile dağıtılmıştır. Daha sonra karıştırıcılı besleyiciye konulmuş ve Falcon ayırıcısına besleme yapılmıştır.

#### 4. ZENGİNLEŞTİRME DENEYLERİ VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Deneysel çalışmalarda, cevher hazırlama endüstrisinde yeni sayılan gravite ayırıcılarından Falcon ayırıcısı kullanılarak yapılan zenginleştirmenin modellenmesi ve optimizasyonu amaçlanmıştır. Zenginleştirme deneyleri, aynı yoğunlukta fakat farklı boyutlarda artık içeren kil ve farklı yoğunluklarda artık içeren kömür üzerinde gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1 Kil Zenginleştirme Deneyleri ve Modellemesi

Kil zenginleştirme deneyleri Çizelge 3.5'te verilen bağımsız değişkenler ve aralıkları için MKT ile belirlenen deney sistematığına göre gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre yapılan metalurjik denge tablosu Çizelge A.1'de verilmiştir. Deneysel yanıtlar olarak seçilen  $d_{90}$  boyutu ve KDK'nın gerçek değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. YYY ile yapılan modelleme çalışmaları sonucu, bağımsız değişkenlerin ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyonları için ikinci dereceden regresyon modelleri  $d_{90}$  boyutu için Çizelge 4.2'de, KDK için ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Genel bir izlenim vermesi açısından, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3, elde edilen model katsayılarına göre incelendiğinde, zenginleştirmeyi en fazla etkileyen bağımsız değişkenin PKO değeri olduğu, bunu G değerinin takip ettiği görülmektedir. Besleme hızının ve besleme miktarının ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Üretilen  $d_{90}$  boyutu modeli için, G değeri sistemi negatif etkilerken PKO değerinin etkisinin ise pozitif olduğu görülmektedir. G değerinin artması,  $d_{90}$  boyutunun küçülmesine, PKO'nun büyümesi ise  $d_{90}$  boyutunun büyümesine neden olmaktadır. KDK için üretilen modelde ise G değeri sistemi pozitif etkilerken PKO'nun etkisi negatif yönde olmaktadır. G değeri arttıkça KDK değeri artarken, PKO'nun artışı ise KDK değerini düşürmektedir. Bu olgu kilin Falcon ayırıcısı ile zenginleştirildiğini göstermektedir. Elde edilmek istenilen  $d_{90}$  boyutlarının 2 mikrona mümkün olduğu kadar yakın, KDK değerlerinin ise 100 meq/100 g'dan büyük olması gerektiği düşünülürse modellerin bu amaçlara yönelik tasarlanan deney programını doğruladığı görülmektedir.

Bu değerlendirmeyi destekler nitelikte olarak, bağımsız değişkenlerin ikili ve üçlü kombinasyonlarına göre üretilmiş modellerin  $R^2$  ve korelasyon katsayıları incelendiğinde de PKO ve G değerinin ayırmada en etkin parametreler olduğu görölmektedir. Besleme hızı ve besleme miktarının ise daha az etkiye sahip oldukları ve yaklaşık olarak aynı etkiyi yaptıkları görölmektedir. Bu iki parametrenin sinerjileri ise bir miktar daha fazla etkili olmaktadır. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

**Çizelge 4.1 :** Kil zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların (KDK ve  $d_{90}$ ) gerçek değerleri.

Deney No	Bağımsız Değişkenler				Yanıt değişkenleri	
	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)	$d_{90}$ boyutu (mikron)	KDK (meq/100 g)
1	90	4	4	2,75	8,1	94
2	160	6	3	3,50	7,6	93
3	230	8	4	1,25	7,7	92
4	90	8	4	1,25	8,4	91
5	230	4	4	2,75	7,3	94
6	90	4	2	2,75	7,1	94
7	230	4	2	1,25	6,4	92
8	160	6	3	2,00	7,6	95
9	20	6	3	2,00	9,9	90
10	160	6	3	2,00	7,6	94
11	160	6	5	2,00	8,0	92
12	90	8	2	2,75	8,5	80
13	160	6	3	2,00	7,1	95
14	160	6	3	2,00	7,8	88
15	300	6	3	2,00	7,2	101
16	160	6	3	0,50	7,4	90
17	230	8	4	2,75	8,4	83
18	230	4	4	1,25	7,2	94
19	160	6	3	2,00	7,2	90
20	230	8	2	1,25	8,1	94
21	160	2	3	2,00	6,9	84
22	90	8	4	2,75	8,7	82
23	160	10	3	2,00	12,2	79
24	160	6	3	2,00	7,8	94
25	230	4	2	2,75	6,6	92
26	90	4	4	1,25	7,7	92
27	90	4	2	1,25	7,5	88
28	90	8	2	1,25	7,1	90
29	160	6	1	2,00	6,9	96
30	230	8	2	2,75	7,3	92
31	160	6	3	2,00	7,5	95

**Çizelge 4.2 :** Kil zenginleştirme deneylerinde  $d_{90}$  için ikinci dereceden iki, üç ve dört değişkenli model denklemleri.

Y	Değişkenler				Regresyon Modeli	$R^2$ (%)	S	R
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$				
G	PKO	-	-		<b>7,30080</b> -0,39065 $X_1$ +0,70085 $X_2$ +0,17791 $X_1^2$ +0,42816 $X_2^2$ +0,10297 $X_1X_2$	<b>63,26</b>	<b>0,708</b>	<b>0,795</b>
G	-	BH	-		<b>7,78553</b> -0,39065 $X_1$ +0,29535 $X_3$ +0,12742 $X_1^2$ -0,14746 $X_3^2$ -0,02691 $X_1X_3$	20,49	1,041	0,453
G	-	-	BM		<b>7,77457</b> -0,39065 $X_1$ +0,10898 $X_4$ +0,12856 $X_1^2$ -0,13444 $X_4^2$ -0,10609 $X_1X_4$	15,36	1,074	0,39
-	PKO	BH	-		<b>7,55453</b> +0,70085 $X_2$ +0,29535 $X_3$ +0,40173 $X_2^2$ -0,12339 $X_3^2$ -0,02091 $X_2X_3$	56,77	0,768	0,753
-	PKO	-	BM		<b>7,54357</b> +0,70085 $X_2$ +0,10898 $X_4$ +0,40287 $X_2^2$ -0,11038 $X_4^2$ +0,08166 $X_2X_4$	51,49	0,813	0,718
-	-	BH	BM		<b>8,02830</b> +0,29535 $X_3$ +0,10898 $X_4$ -0,17274 $X_3^2$ -0,16087 $X_4^2$ +0,06866 $X_3X_4$	11,59	1,098	0,340
$d_{90}$ (mikron)	G	PKO	BH	-	<b>7,39982</b> -0,39065 $X_1$ +0,70085 $X_2$ +0,29535 $X_3$ +0,16760 $X_1^2$ +0,41785 $X_2^2$ -0,10728 $X_3^2$ +0,10297 $X_1X_2$ -0,02691 $X_1X_3$ -0,02091 $X_2X_3$	<b>70,43</b>	<b>0,693</b>	<b>0,839</b>
	G	PKO	-	BM	<b>7,38770</b> -0,39065 $X_1$ +0,70085 $X_2$ +0,10898 $X_4$ +0,16886 $X_1^2$ +0,41911 $X_2^2$ -0,09414 $X_4^2$ +0,10297 $X_1X_2$ -0,10609 $X_1X_4$ +0,08166 $X_2X_4$	<b>65,69</b>	<b>0,746</b>	<b>0,810</b>
	G	-	BH	BM	<b>7,92399</b> -0,39065 $X_1$ +0,29535 $X_3$ +0,10898 $X_4$ +0,11300 $X_1^2$ -0,16188 $X_3^2$ -0,15000 $X_4^2$ -0,02691 $X_1X_3$ -0,10609 $X_1X_4$ +0,06866 $X_3X_4$	23,99	1,111	0,490
	-	PKO	BH	BM	<b>7,66842</b> +0,70085 $X_2$ +0,29535 $X_3$ +0,10898 $X_4$ +0,38987 $X_2^2$ -0,13526 $X_3^2$ -0,12338 $X_4^2$ -0,02091 $X_2X_3$ +0,08166 $X_2X_4$ +0,06866 $X_3X_4$	59,43	0,811	0,771
	G	PKO	BH	BM	<b>7,50886</b> -0,39065 $X_1$ +0,70085 $X_2$ +0,29535 $X_3$ +0,10898 $X_4$ +0,15624 $X_1^2$ +0,40649 $X_2^2$ -0,11864 $X_3^2$ -0,10676 $X_4^2$ +0,10297 $X_1X_2$ -0,02691 $X_1X_3$ -0,10609 $X_1X_4$ -0,02091 $X_2X_3$ +0,08166 $X_2X_4$ +0,06866 $X_3X_4$	<b>73,29</b>	<b>0,754</b>	<b>0,856</b>

G : Oransal santrifüj kuvvet  
 $R^2$  : Regresyon katsayısı  
 PKO : Pülpte katı oranı (%)  
 S : Standart sapma  
 BH : Besleme hızı (l/dk.)  
 R : Korelasyon katayısı  
 BM : Besleme miktarı (l)

**Çizelge 4.3 :** Kil zenginleştirme deneylerinde KDK için ikinci dereceden iki, üç ve dört değişkenli model denklemleri.

Y	Değişkenler				Regresyon Modeli	R <sup>2</sup> (%)	S	R
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>				
KDK (meq/100 g)	G	PKO	-	-	<b>92,8616</b> +1,8682X <sub>1</sub> -2,0380X <sub>2</sub> +0,5030X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -2,8938X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +0,9341X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	<b>61,93</b>	<b>3,359</b>	<b>0,787</b>
	G	-	BH	-	<b>89,9613</b> +1,8682X <sub>1</sub> -0,4529X <sub>3</sub> +0,8051X <sub>1</sub> <sup>2</sup> +0,5503X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,8492X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	17,00	4,959	0,412
	G	-	-	BM	<b>90,5884</b> +1,8682X <sub>1</sub> -0,6793X <sub>4</sub> +0,7398X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -0,1943X <sub>4</sub> <sup>2</sup> +0,0000X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	15,23	5,012	0,390
	-	PKO	BH	-	<b>93,0968</b> -2,0380X <sub>2</sub> -0,4529X <sub>3</sub> -2,9183X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +0,2237X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,9341X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	50,49	3,830	0,711
	-	PKO	-	BM	<b>93,7239</b> -2,0380X <sub>2</sub> -0,6793X <sub>4</sub> -2,9836X <sub>2</sub> <sup>2</sup> -0,5209X <sub>4</sub> <sup>2</sup> -2,2928X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	61,66	3,370	0,785
	-	-	BH	BM	<b>90,8236</b> -0,4529X <sub>3</sub> -0,6793X <sub>4</sub> +0,4605X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,2188X <sub>4</sub> <sup>2</sup> -0,8492X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	4,82	5,310	0,220
	G	PKO	BH	-	<b>92,6081</b> +1,8682X <sub>1</sub> -2,0380X <sub>2</sub> -0,4529X <sub>3</sub> +0,5294X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -2,8674X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +0,2746X <sub>3</sub> <sup>2</sup> +0,9341X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> -0,8492X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> -0,9341X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	<b>66,33</b>	<b>3,446</b>	<b>0,814</b>
	G	PKO	-	BM	<b>93,3019</b> +1,8682X <sub>1</sub> -2,0380X <sub>2</sub> -0,6793X <sub>4</sub> +0,4571X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -2,9396X <sub>2</sub> <sup>2</sup> -0,4770X <sub>4</sub> <sup>2</sup> +0,9341X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> +0,0000X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> -2,2928X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	<b>75,67</b>	<b>2,930</b>	<b>0,870</b>
	G	-	BH	BM	<b>90,0931</b> +1,8682X <sub>1</sub> -0,4529X <sub>3</sub> -0,6793X <sub>4</sub> +0,7914X <sub>1</sub> <sup>2</sup> +0,5366X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,1427X <sub>4</sub> <sup>2</sup> -0,8492X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> +0,0000X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> -0,8492X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	20,13	5,308	0,449
	-	PKO	BH	BM	<b>93,5621</b> -2,0380X <sub>2</sub> -0,4529X <sub>3</sub> -0,6793X <sub>4</sub> -2,9667X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +0,1753X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,5041X <sub>4</sub> <sup>2</sup> -0,9341X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> -2,2928X <sub>2</sub> X <sub>4</sub> -0,8492X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	65,89	3,469	0,812
G	PKO	BH	BM	<b>93,0707</b> +1,8682X <sub>1</sub> -2,0380X <sub>2</sub> -0,4529X <sub>3</sub> -0,6793X <sub>4</sub> +0,4812X <sub>1</sub> <sup>2</sup> -2,9155X <sub>2</sub> <sup>2</sup> +0,2264X <sub>3</sub> <sup>2</sup> -0,4529X <sub>4</sub> <sup>2</sup> +0,9341X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> -0,8492X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> +0,0000X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> -0,9341X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> -2,2928X <sub>2</sub> X <sub>4</sub> -0,8492X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	<b>81,53</b>	<b>2,924</b>	<b>0,903</b>	

G : Oransal santrifüj kuvvet  
R<sup>2</sup> : Regresyon katsayısı

PKO : Pülpte katı oranı (%)  
S : Standart sapma

BH : Besleme hızı (l/dk.)  
R : Korelasyon katayısı

BM : Besleme miktarı (l)



#### 4.1.1 Varyans analizi (ANOVA)

Gerçeğe en yakın modellerin, tüm bağımsız değişkenlerin kullanılması ile üretilen modeller olduğu görülmektedir. Falcon ayırıcısı ile yapılan kil zenginleştirme deneyleri için seçilen yanıt değişkenleri için modeller  $d_{90}$  için denklem (4.1)'de, KDK için denklem (4.2)'de verilmiştir. Bu modellerin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA),  $d_{90}$  için Çizelge 4.4'te, KDK için ise Çizelge 4.5'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} Y_{d_{90}} = & 7,50886 - 0,39065X_1 + 0,70085X_2 + 0,29535X_3 + 0,10898X_4 \\ & + 0,15624X_1^2 + 0,40649X_2^2 - 0,11864X_3^2 - 0,10676X_4^2 + 0,10297X_1X_2 - \\ & 0,02691X_1X_3 - 0,10609X_1X_4 - 0,02091X_2X_3 + 0,08166X_2X_4 \\ & + 0,06866X_3X_4 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} Y_{KDK} = & \mathbf{93,0707} + 1,8682X_1 - 2,0380X_2 - 0,4529X_3 - 0,6793X_4 + 0,4812X_1^2 - \\ & 2,9155X_2^2 + 0,2264X_3^2 - 0,4529X_4^2 + 0,9341X_1X_2 - 0,8492X_1X_3 \\ & + 0,0000X_1X_4 - 0,9341X_2X_3 - 2,2928X_2X_4 - 0,8492X_3X_4 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Modelin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.4 ve 4.5'ten görüldüğü gibi, model F değerleri,  $d_{90}$  modeli için 3,14, KDK modeli için 5,05 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2'den 2,44 olarak okunan  $F_{0,05(14,16)}$  değerinden büyük çıkmışlardır.  $F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{çizelge}}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modellerinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

#### 4.1.2 Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince modeller için hesaplanan  $\text{Prob} > F$  değerleri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Her iki model için elde edilmiş olan P değerleri ( $d_{90}$  modeli için 0,016, KDK modeli için 0,001)  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.4'ten,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak  $d_{90}$  boyutu üzerinde etkin olan parametrelerin G, PKO ve PKO<sup>2</sup> kodlu değerleri ile verilen G değeri ve PKO olduğu görülmektedir. Katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin PKO olduğu, daha sonra G değeri geldiği anlaşılmıştır. Besleme hızı ve besleme miktarının ise etkileri

azdır. PKO ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki, G değeri ile yanıt arasında ise negatif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, PKO arttıkça  $d_{90}$  boyutunun büyüyeceği, G değerindeki artışının ise  $d_{90}$  boyutunu küçülteceğidir. PKO'nun, aynı zamanda, yanıt üzerinde pozitif kuadratik etkisi de söz konusudur. Bu değerdeki bir değişim yanıt üzerine karesi şeklinde yansıtacaktır.

**Çizelge 4.4 :** Kil zenginleştirme deneylerinde  $d_{90}$  modeli için varyans analizi (ANOVA).

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regression</b>	<b>14</b>	<b>24,9703</b>	<b>1,7836</b>	<b>3,14</b>	<b>0,016</b>
G	1	3,6625	3,6625	6,44	0,022
PKO	1	11,7887	11,7887	20,73	0,000
BH	1	2,0936	2,0936	3,68	0,073
BM	1	0,2850	0,2850	0,50	0,489
$G^2$	1	0,5795	0,6980	1,23	0,284
$PKO^2$	1	5,3517	4,7250	8,31	0,011
$BH^2$	1	0,3329	0,4025	0,71	0,413
$BM^2$	1	0,3259	0,3259	0,57	0,460
G*PKO	1	0,1696	0,1696	0,30	0,593
G*BH	1	0,0116	0,0116	0,02	0,888
G*BM	1	0,1801	0,1801	0,32	0,581
PKO*BH	1	0,0070	0,0070	0,01	0,913
PKO*BM	1	0,1067	0,1067	0,19	0,671
BH*BM	1	0,0754	0,0754	0,13	0,721
<b>Kalan Hatası</b>	<b>16</b>	<b>9,1006</b>	<b>0,5688</b>		
Uyum eksikliği	10	8,6290	0,8629	10,98	0,004
Saf hata	6	0,4717	0,0786		
<b>Toplam</b>	<b>30</b>	<b>34,0710</b>			

Çizelge 4.5'ten ise, KDK üzerinde etkin olan parametrelerin G, PKO,  $PKO^2$  ve PKO\*BM kodlu değerleri ile verilen G değeri ve PKO olduğu görülmektedir. Katsayıların incelenmesi sonunda en etkin parametrenin PKO olduğu, daha sonra G değeri geldiği anlaşılmıştır. Besleme hızı ve besleme miktarının ise etkileri azdır. PKO ile yanıt arasında negatif doğrusal etki, G değeri ile yanıt arasında ise pozitif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, PKO azaldıkça KDK değerinin artacağı, G değerinin artışının ise KDK değerini artıacağıdır. PKO'nun, aynı zamanda, yanıt üzerinde hem negatif kuadratik hem de besleme hızı ile negatif kesişim etkisi vardır. Negatif kuadratik etki sebebi ile PKO'nun artışı ile KDK değeri artacak, ancak belirli bir değerden sonra artış devam ederse KDK değeri azalacaktır. Besleme miktarı ile olan kesişim etkisi ise ikisinin birlikte artışı sonucu, KDK değeri maksimum değere ulaşacağı ve ancak artışları sürerse KDK değeri azalacağıdır.

**Çizelge 4.5 :** Kil zenginleştirme deneylerinde KDK modeli için varyans analizi (ANOVA).

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regression</b>	<b>14</b>	<b>603,914</b>	<b>43,137</b>	<b>5,05</b>	<b>0,001</b>
G	1	83,765	83,765	9,80	0,006
PKO	1	99,687	99,687	11,66	0,004
BH	1	4,923	4,923	0,58	0,459
BM	1	11,076	11,076	1,30	0,272
G <sup>2</sup>	1	16,851	6,622	0,77	0,392
PKO <sup>2</sup>	1	244,458	243,074	28,43	0,000
BH <sup>2</sup>	1	2,181	1,466	0,17	0,684
BM <sup>2</sup>	1	5,865	5,865	0,69	0,420
G*PKO	1	13,961	13,961	1,63	0,220
G*BH	1	11,538	11,538	1,35	0,262
G*BM	1	0,000	0,000	0,00	1,000
PKO*BH	1	13,961	13,961	1,63	0,220
PKO*BM	1	84,111	84,111	9,84	0,006
BH*BM	1	11,538	11,538	1,35	0,262
<b>Kalan Hatası</b>	<b>16</b>	<b>136,800</b>	<b>8,550</b>		
Uyum eksikliği	10	87,880	8,788	1,08	0,485
Saf hata	6	48,920	8,153		
<b>Toplam</b>	<b>30</b>	<b>740,714</b>			

Tüm bağımsız değişkenler kullanılarak türetilen modellerden elde edilen  $d_{90}$  boyutu ve KDK değerleri ile deneysel olarak bulunan  $d_{90}$  boyutu ve KDK değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Kil zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen modellerin regresyon katsayıları,  $d_{90}$  boyutu için Şekil 4.1'de, KDK değeri için Şekil 4.2'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere  $d_{90}$  boyutu için  $R^2$  değeri 0,73, KDK değeri için  $R^2$  değeri 0,82 olarak belirlenmiştir. Model denklemler Falcon ayırıcısı ile kil zenginleştirme işleminin  $d_{90}$  boyutu temel alındığında % 73'ünü, KDK temel alındığında % 82'sini açıkladığını göstermektedir. Korelasyon katsayıları ise  $d_{90}$  boyutu için 0,856 iken KDK için 0,903 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

#### 4.1.3 Model uygunluk testleri

Katsayılarından sonra modelin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılar da test edilmiştir.

**Çizelge 4.6 : Kil zenginleştirme deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.**

Deney No	d <sub>90</sub> (mikron)			KDK (meq/100 g)		
	Deneysel	Tahmin	Hata	Deneysel	Tahmin	Hata
1	7,5	7,2	0,3	88	88	0
2	7,6	7,5	0,1	95	93	2
3	7,2	7,4	-0,2	101	99	2
4	7,1	7,4	-0,3	94	93	1
5	7,6	7,3	0,3	93	90	3
6	8,1	8,2	-0,1	94	94	0
7	8,4	8,7	-0,3	83	85	-2
8	8,7	9,5	-0,8	82	81	1
9	6,4	6,5	-0,1	92	91	1
10	9,9	8,9	1,0	90	91	-1
11	7,1	8,3	-1,2	90	88	2
12	7,6	7,5	0,1	94	93	1
13	12,2	10,5	1,7	79	77	2
14	7,1	7,5	-0,4	95	93	2
15	7,7	7,8	-0,1	92	92	0
16	7,3	6,9	0,4	94	94	0
17	7,8	7,5	0,3	88	93	-5
18	7,2	7,5	-0,3	90	93	-3
19	8,5	8,8	-0,3	80	84	-4
20	8,1	8	0,1	94	96	-2
21	7,8	7,5	0,3	94	93	1
22	8,4	8,8	-0,4	91	89	2
23	7,4	6,9	0,5	90	93	-3
24	6,9	7,7	-0,8	84	85	-1
25	6,9	6,4	0,5	96	95	1
26	8	7,6	0,4	92	93	-1
27	6,6	6,2	0,4	92	96	-4
28	7,2	7	0,2	94	92	2
29	7,3	8	-0,7	92	91	1
30	7,7	8,4	-0,7	92	93	-1
31	7,5	7,5	0,0	95	93	2

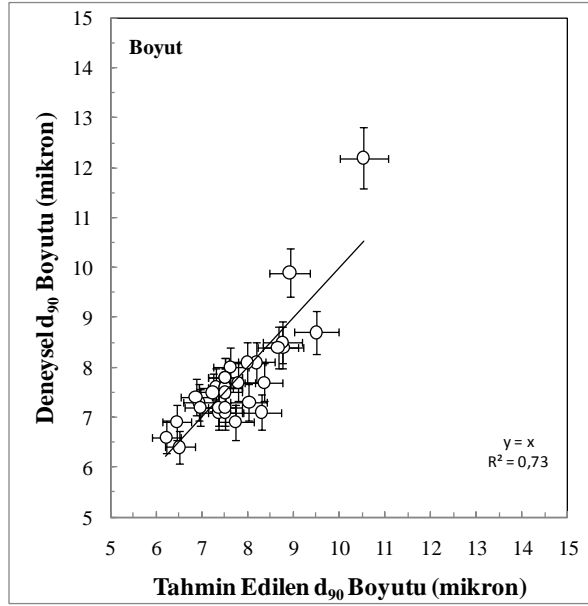
#### 4.1.3.1 Normalite varsayımı

Şekil 4.3 ve 4.4'te kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafiklerden noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrilerinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.

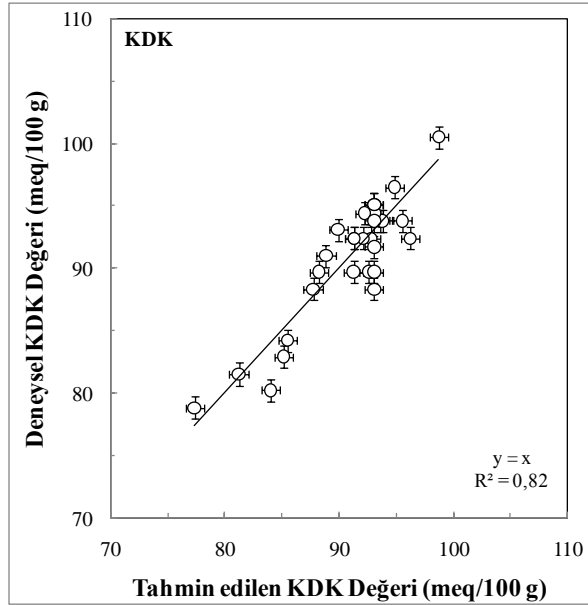
#### 4.1.3.2 Kalıntıların model değerlerine göre karşılaştırmalı diyagramı

Şekil 4.5 ve 4.6'da hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz

konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



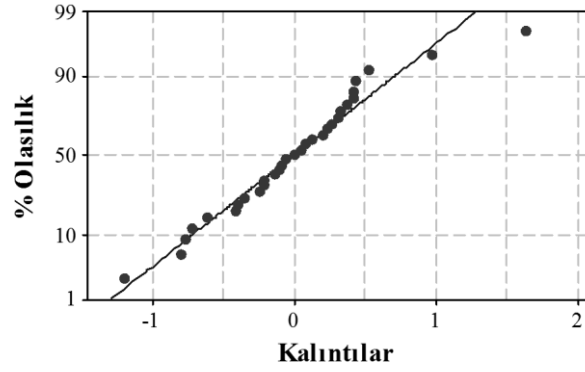
Şekil 4.1 :  $d_{90}$  boyutu için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.



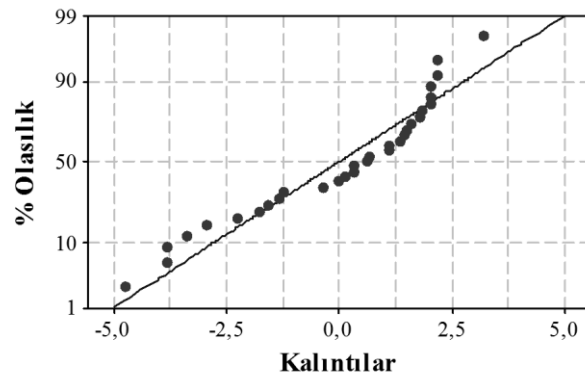
Şekil 4.2 : KDK değerlerini için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

#### 4.1.3.3 Zaman sıralamasında kalıntıların işaretlenmesi

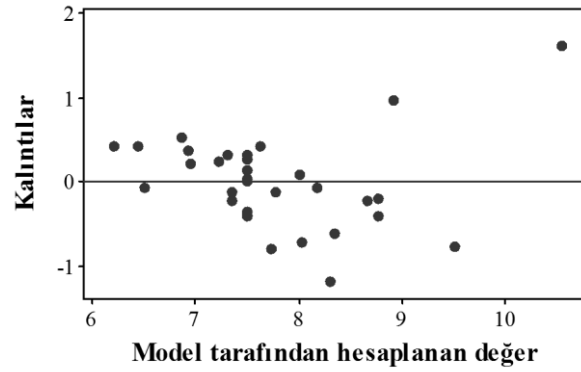
Şekil 4.7 ve 4.8'de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir



Şekil 4.3 :  $d_{90}$  boyutu için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.



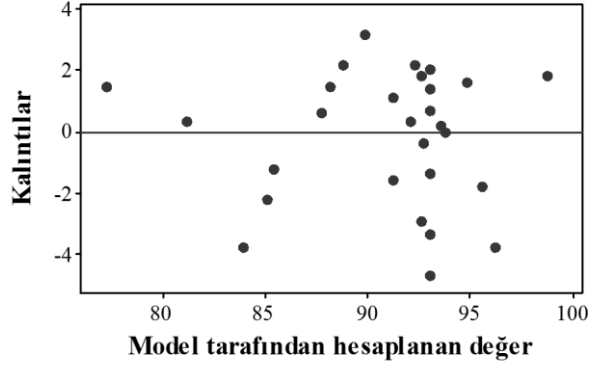
Şekil 4.4 : KDK için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.



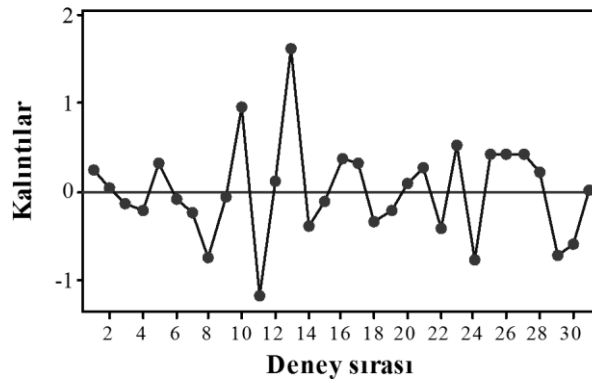
Şekil 4.5 :  $d_{90}$  boyutu için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

#### 4.1.4 Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri

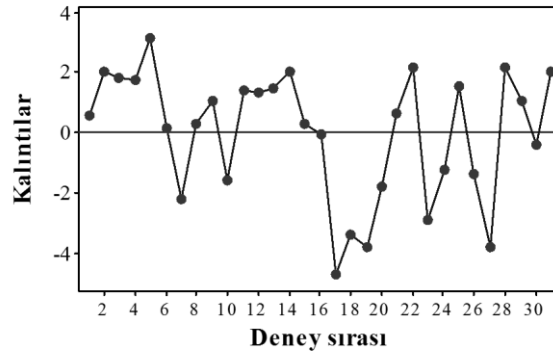
Oluşturulan modellerle elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılması ve optimizasyon amacı ile bağımsız değişkenlerin ikili kombinasyonlarının yanıt değişkenleri üzerine etkilerini gösteren kontur ve yanıt yüzeyi grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.9-13) ve her bir değişken için en iyi zenginleştirme şartları belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.6 : KDK için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.



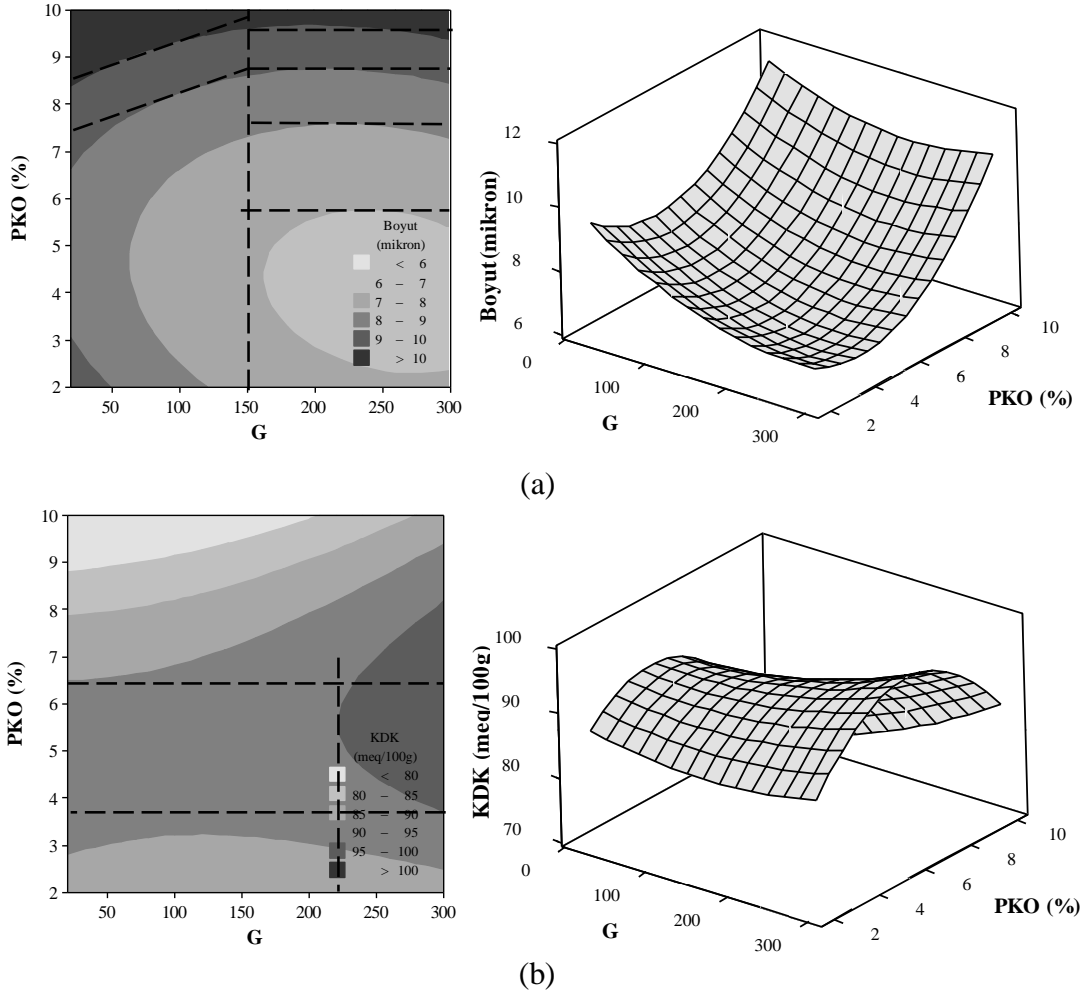
Şekil 4.7 :  $d_{90}$  boyutu için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.



Şekil 4.8 : KDK için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

#### 4.1.4.1 G ve PKO'nun zenginleştirmeye etkisi

Şekil 4.9 (a)'da G ve PKO'nun  $d_{90}$  boyutuna etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı, minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ile PKO arasındaki iç etkileşimin  $d_{90}$  boyutu için önemli olduğunu göstermektedir. Görüldüğü gibi durağan noktadan uzaklaştıkça  $d_{90}$  boyutu büyümektedir.



Şekil 4.9 : G ve PKO'ya göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, düşük G değerlerinde  $d_{90}$  boyutuna G ve PKO birlikte etki etmektedir. 150 G'ye kadar PKO'nun azalması ve G değerinin artması ile  $d_{90}$  boyutu küçülmektedir. Ancak daha büyük G değerlerinde etkin parametre PKO olmaktadır. 150 G'den sonra ise konsantre boyutu G'den bağımsız olarak hareket ederek PKO azalması ile küçülmektedir. PKO'nun % 6'dan küçük ve G değerinin 150'den büyük olduğu şartlarda ayırma boyutu ( $d_{90}$ ) 6-7 mikrona kadar inmektedir.

Şekil 4.9 (b)'de de G ve PKO'nun KDK'ya etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde kaldığını ve G ve PKO arasındaki iç etkileşimin KDK'yı da etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak KDK'da artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Yüksek PKO'larda G'nin değişimi KDK'yı etkilememektedir. Ancak G'nin yüksek PKO'nun ise daha düşük olduğu durumlarda KDK değeri artmaktadır.



Sistemin eyer yapısından kaynaklı olarak çok düşük PKO'larda G tekrardan etkisini kaybetmekte ve KDK azalmaktadır.

Kontur grafiği incelendiğinde ise, PKO'nun % 6'dan daha büyük olduğu değerlerde G'nin etkisinin olmadığı ve KDK'nın azaldığı görülmektedir. PKO için en ideal çalışma aralığı % 3-6 olarak tespit edilmiştir. KDK değeri 95-100 meq/100 g olan bir ürün elde etmek için PKO'nun % 4-6 aralığında iken G değerinin 225'ten fazla olması gerekmektedir.

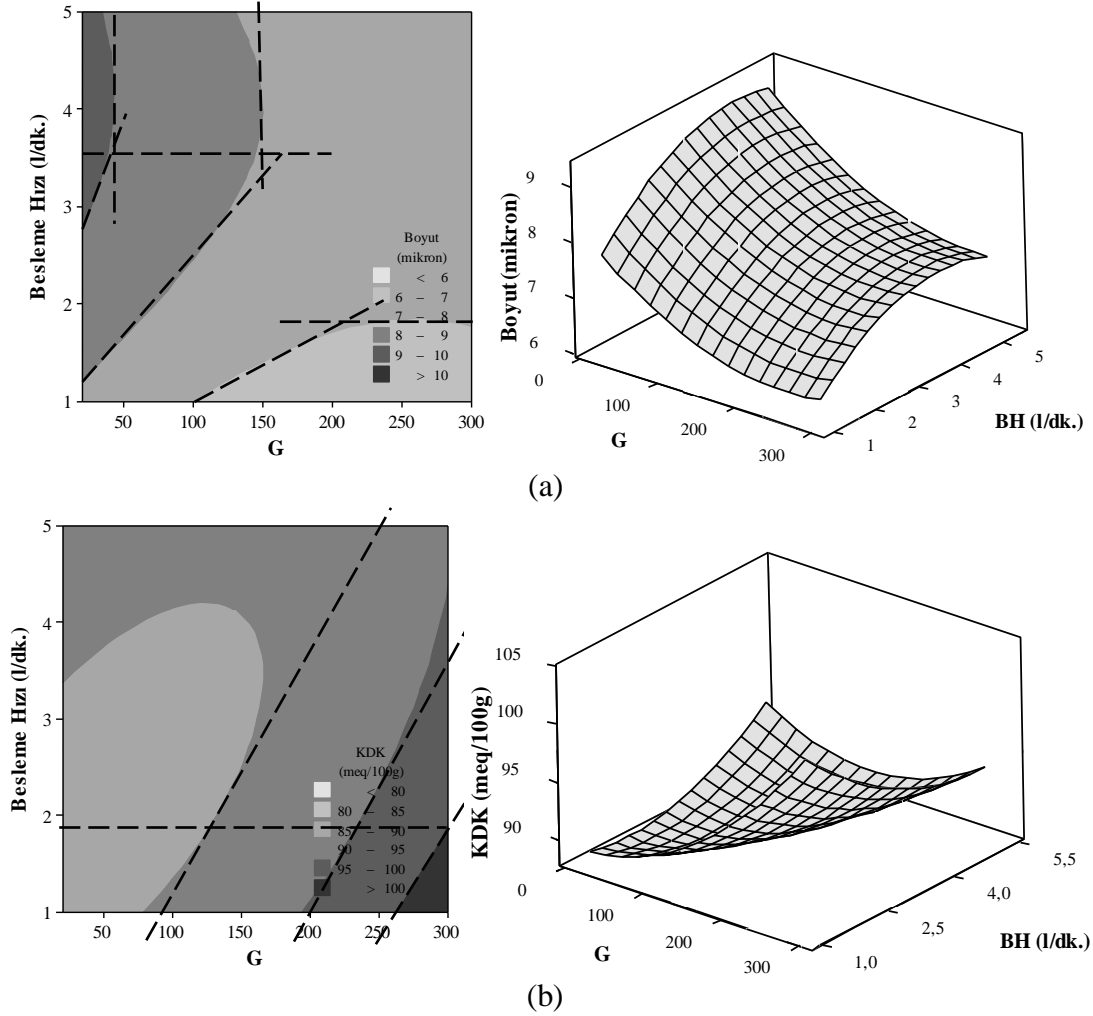
#### **4.1.4.2 G ve besleme hızının zenginleştirmeye etkisi**

şekil 4.10 (a)'da G ve besleme hızının  $d_{90}$  boyutuna yaptıkları etki görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiği eyer noktası yapısındadır. Bu yapı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu gösterir. G ve besleme hızı arasındaki i etkileşimin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğinin göstergesidir. Bununla birlikte baskın olan parametre G olarak görülmektedir. Çizelge 4.2'deki G ve besleme hızına göre türetilen denklemlerin  $R^2$  ve korelasyon katsayıları bu olguyu desteklemektedir. Yüksek G ve düşük besleme hızlarında  $d_{90}$  boyutu en büyük değerini almaktadır.

Kontur grafiğinden G değerinin 150'den daha düşük olduğu şartlarda, besleme hızı 3,5 litre/dakikanın üzerinde ise sadece G'nin etkisi gözlenirken, 3,5 litre/dakikanın altındaki besleme hızlarında besleme hızının da etkisinin olduğu görülmektedir. Bu şartlarda besleme hızının azalıp G değerinin artması  $d_{90}$  boyutunun küçülmesine sebep olmaktadır. G değeri 150'nin üzerinde ise besleme hızının ayırmaya etkisi artmaktadır. Düşük besleme hızı (1,5 litre/dakika) ve yüksek G değeri (200)  $d_{90}$  boyutu 6-7 mikrona kadar küçülmektedir. diğer bir ifade ile zenginleştirme olmaktadır.

G ve besleme hızının KDK'ya etkileri şekil 4.10 (b)'de görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu göstermektedir. G ve besleme hızının i etkileşimleri KDK'yı azda olsa etkilemektedir. Durağan noktadan uzaklaşmak KDK yönünden olumlu etki göstermektedir. Kontur grafiği, KDK değerinin artması için besleme hızının azalması ve G değerinin artmasının gerektiği göstermektedir. KDK değeri 95-100 meq/100 g olan bir ürün eldesi için besleme hızının 1, 2, 3 ve 4 litre/dakika olarak değiştirildiğinde G değerinin sırası ile 200, 225, 275 ve 300 olması gerekmektedir. KDK değeri 100 meq/100 g'dan büyük bir ürün elde etmek için ise besleme hızı 2

litre/dakikadan daha düşük hızlarda iken G değerinin 275-300 aralığında olması gerekmektedir.



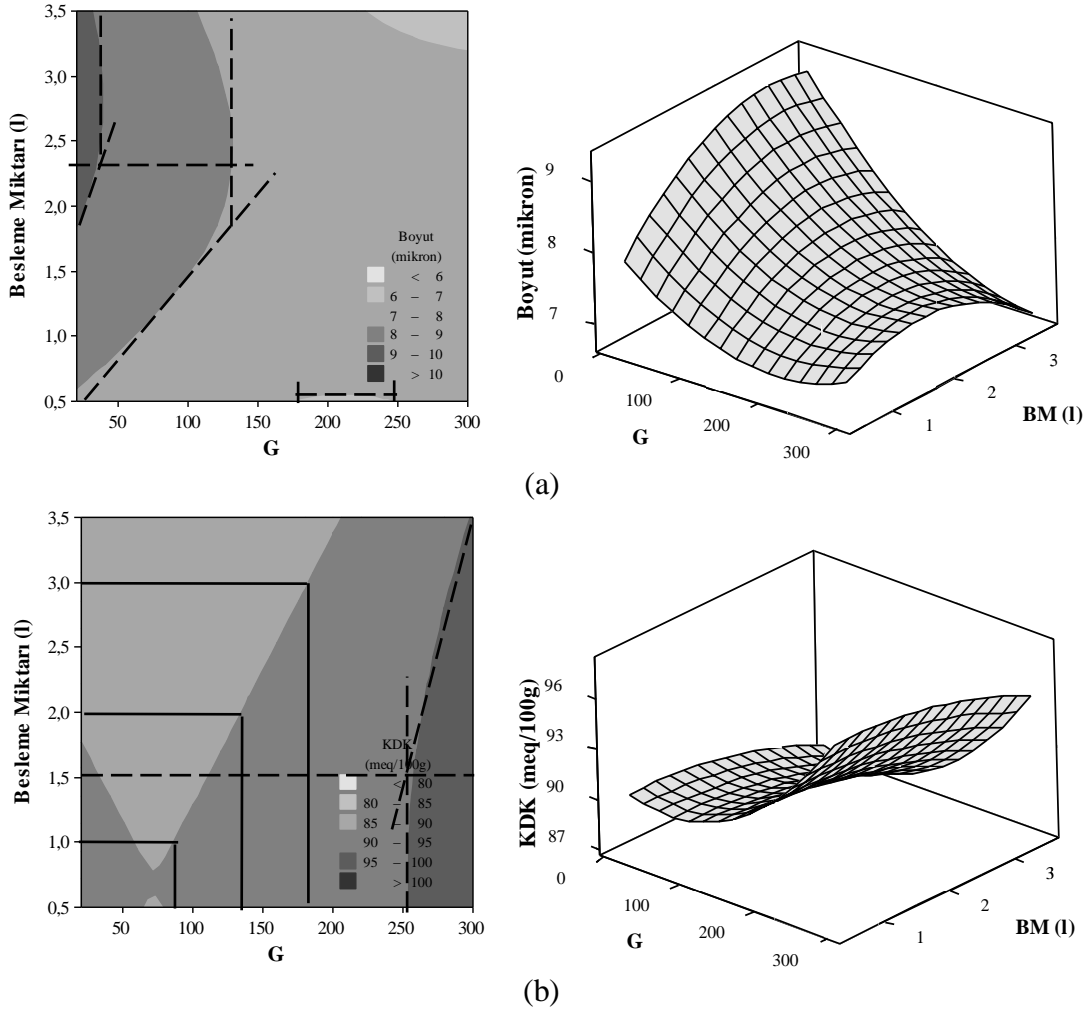
Şekil 4.10 : G ve besleme hızına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

#### 4.1.4.3 G ve besleme miktarının zenginleştirmeye etkisi

Şekil 4.11 (a)'da G ve besleme miktarının  $d_{90}$  boyutuna etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer noktası yapısında olması, G ve besleme miktarı arasındaki iç etkileşimin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğini gösterir. Grafiğin yapısından da baskın değişkenin G olduğu ve yüksek G değerlerinde hem düşük hem de yüksek besleme miktarlarında  $d_{90}$  boyutunun oldukça küçük değerlere indiği görülmektedir.

Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, 150 G'ye kadar, 2 litreden fazla besleme miktarlarında  $d_{90}$  boyutu sadece G değerinin etkisi altındadır. 2 litreden az beslemeler için ise G ve besleme miktarı birlikte etki etmektedir. G değerinin 150'den daha büyük olduğu şartlarda ise  $d_{90}$  boyutunun besleme miktarından bağımsız, sadece G değerinin etkisi altında olduğu görülmektedir. Elde edilen en iyi

sonuç olan 6-7 mikronluk  $d_{90}$  boyutları, 175-200 G, 0,75 litre ve 275-300 G, 3,5 litre elde edilmiştir.



**Şekil 4.11 :** G ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

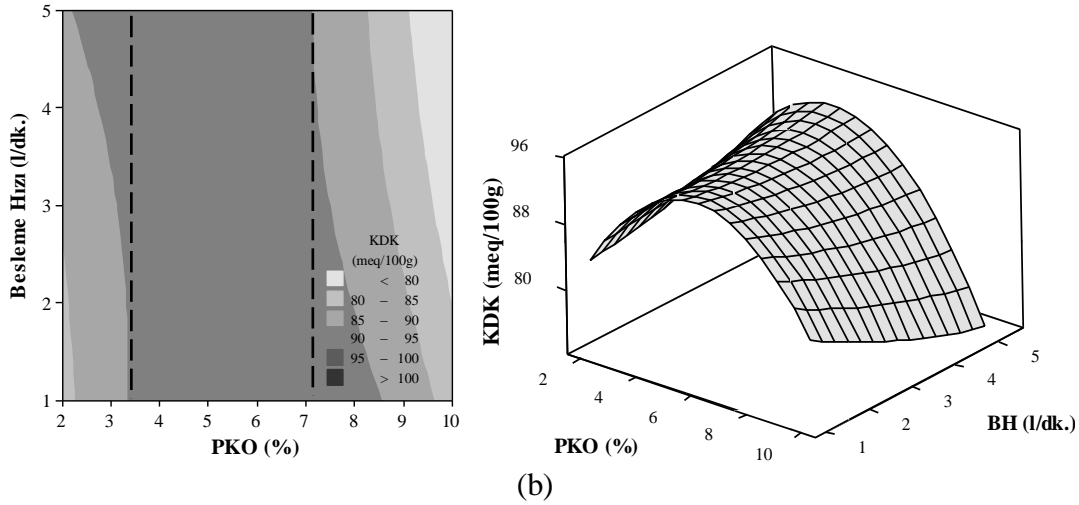
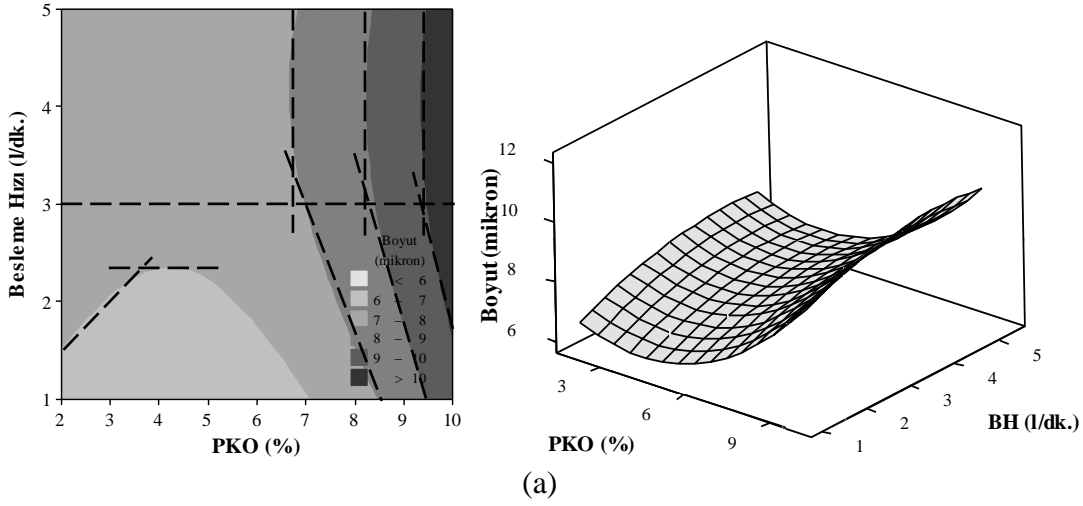
Şekil 4.11 (b), G ve besleme miktarının KDK'ya olan etkilerini göstermektedir. Yanıt yüzeyi grafiği eyer nokta yapısındadır, G ve besleme miktarı iç etkileşimlerinin KDK üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük G ve besleme miktarlarında birlikte etkileri vardır. Ancak yüksek G değerlerinde KDK değeri besleme miktarından daha fazla G tarafından etkilenmektedir.

Kontur grafiğinde, KDK değerinin 250 G'ye kadar 90-95 meq/100 g aralığında kaldığı görülmektedir. Ancak bu aralıkta besleme miktarının artışı ile KDK değerinin 90-95 meq/100 g aralığında kalması için G değerinin de artırılması gerekmektedir.

En yüksek KDK değeri 95-100 meq/100 g olan bir ürün elde etmek için 1,5 litrelik besleme miktarına kadar 250 G yeterli iken, 1,5 litreden daha fazla besleme miktarları için G değerinin de artırılması gerekmektedir.

#### 4.1.4.4 PKO ve besleme hızının zenginleştirmeye etkisi

Şekil 4.12 (a)'da PKO ve besleme hızının  $d_{90}$  boyutuna etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olduğu ve PKO ile besleme hızının iç etkileşiminin  $d_{90}$  boyutunu etkilediği göstermektedir. PKO ve besleme hızının düşük değerlerde olduğu bölgelerde  $d_{90}$  boyutu için en iyi değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.12 : PKO ve besleme hızına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere PKO arttıkça  $d_{90}$  boyutunda büyüme görülmektedir. PKO % 7'den daha büyük değerlerde olduğunda,  $d_{90}$  boyutunun değişimi sadece PKO'nun etkisinde ve besleme hızından bağımsız olmaktadır.

PKO'nun % 7'nin altında olduğu ayırma şartlarında ise en etkin ayırmanın besleme hızının 2,5 litre/dakikadan daha düşük besleme hızlarında elde edildiği görülmektedir. Bu şartlarda elde edilen ürünün boyutu 6-7 mikron aralığında olmaktadır. İyi bir ayırma için besleme hızının ve PKO'nun düşürülmesi gerekir.

Şekil 4.12 (b)'de ise PKO ve besleme hızının KDK'ya etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölgede olmadığını gösterir. Bu, bağımsız değişkenlerden sadece birinin yanıt üzerinde etkili olduğunun göstergesidir. Grafikten de KDK'nın sadece PKO değişimine göre hareket ettiği, besleme hızından etkilenmediği görülmektedir. Kontur grafiğinden ise en yüksek KDK değerlerinin PKO'nun % 3,5-7,5 aralığında olduğu koşullarda elde edildiği görülmektedir.

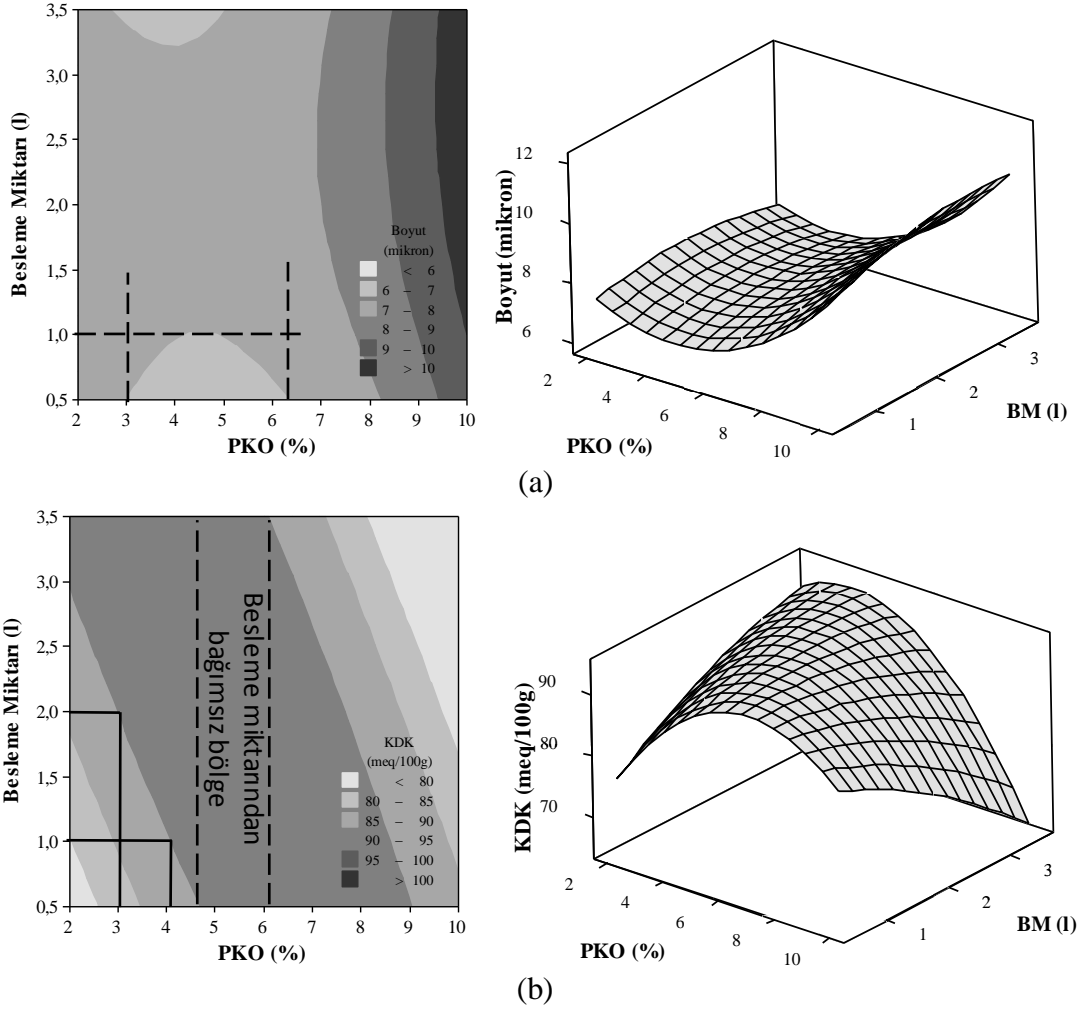
#### **4.1.4.5 PKO ve besleme miktarının zenginleştirmeye etkisi**

Şekil 4.13 (a)'da PKO ve besleme miktarının  $d_{90}$  boyutuna etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olduğu ve PKO ile besleme miktarının iç etkileşiminin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğini göstermektedir. PKO ve besleme miktarının düşük değerlerde olduğu bölgelerde  $d_{90}$  boyutu için en iyi değerler elde edilmiştir. Kontur grafiği, Şekil 4.12 (a)'da olduğu gibi PKO arttıkça  $d_{90}$  boyutunda büyüme görülmektedir. Aynı şekilde, PKO % 7'den daha büyük olduğunda, besleme miktarının ayırmaya etkisi kalmamaktadır. PKO % 3-6 aralığında ve besleme miktarı 1 litreden daha az olduğunda elde edilen ürünün  $d_{90}$  boyutu 6-7 mikron aralığında olmaktadır.

Şekil 4.13 (b)'de PKO ve besleme miktarının KDK'ya etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölgede olmadığını gösterir. Bu, bağımsız değişkenlerden sadece birinin yanıt üzerinde etkili olduğunun göstergesidir. Grafikten de KDK'nın sadece PKO değişimine göre hareket ettiği, besleme hızından etkilenmediği görülmektedir. Kontur grafiğinden, PKO % 4,5-6 aralığında olduğunda elde edilen ürünün kalitesinin besleme miktarından bağımsız olduğu görülmektedir. Ancak yüksek besleme miktarlarında ürün kalitesini korumak için PKO'nun da düşürülmesi gerekmektedir.

PKO'nun etkilerinin incelendiği deneylerden de görüldüğü üzere yüksek PKO değerlerinde kil zenginleştirmesi olumsuz etkilenmektedir. Bilindiği gibi yüksek şişme ve su alma kapasiteleri olduğundan dolayı killerle çok yüksek PKO'larda (%8'in üzerinde) çalışıldığı zaman ortam viskozitesi artar ve bu olgu ayırma yoğunluğunu olumsuz etkileyerek ayırmanın kötüleşmesine sebep olur. Benzer şekilde, çok düşük PKO değerlerinde çalışmak da ayırmanın gerçekleştiği yatağın oluşumunu olumsuz etkileyeceğinden ayırma bu şartlarda da kötüleşir. Bentonit

zenginleştirmesinde çalışılması tavsiye edilen PKO % 4-6 arasındadır (Grim, 1968, Grim ve Güven, 1978). Bu çalışmada da elde edilen veriler bu bulguyu doğrulamaktadır.



**Şekil 4.13 :** PKO ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

Bağımsız değişkenlerin ikili kombinasyonları için çizilen her bir yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerinden, her bir değişken için en iyi ayırma şartlarını sağlayan en düşük ve en yüksek ayırma aralıkları tespit edilmiştir. En iyi ayırma şartlarının G değeri için 100-300, PKO için % 2-7, besleme hızı için 0,5-2,5 litre/dakika ve besleme miktarı için 0,5-1,5 litre aralığında olduğu tespit edilmiş ve bu değerler Çizelge 4.7’de toplu olarak verilmiştir.

#### 4.1.4.6 G, PKO, besleme hızı ve miktarının zenginleştirmeye etkisi

Bağımsız değişkenlerin tümüne göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer iki değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 4.7’te verilen ikili

kombinasyonlar ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerinden tespit edilen en düşük ve en yüksek değerlerin aritmetik ortalamaları olarak alınmıştır.

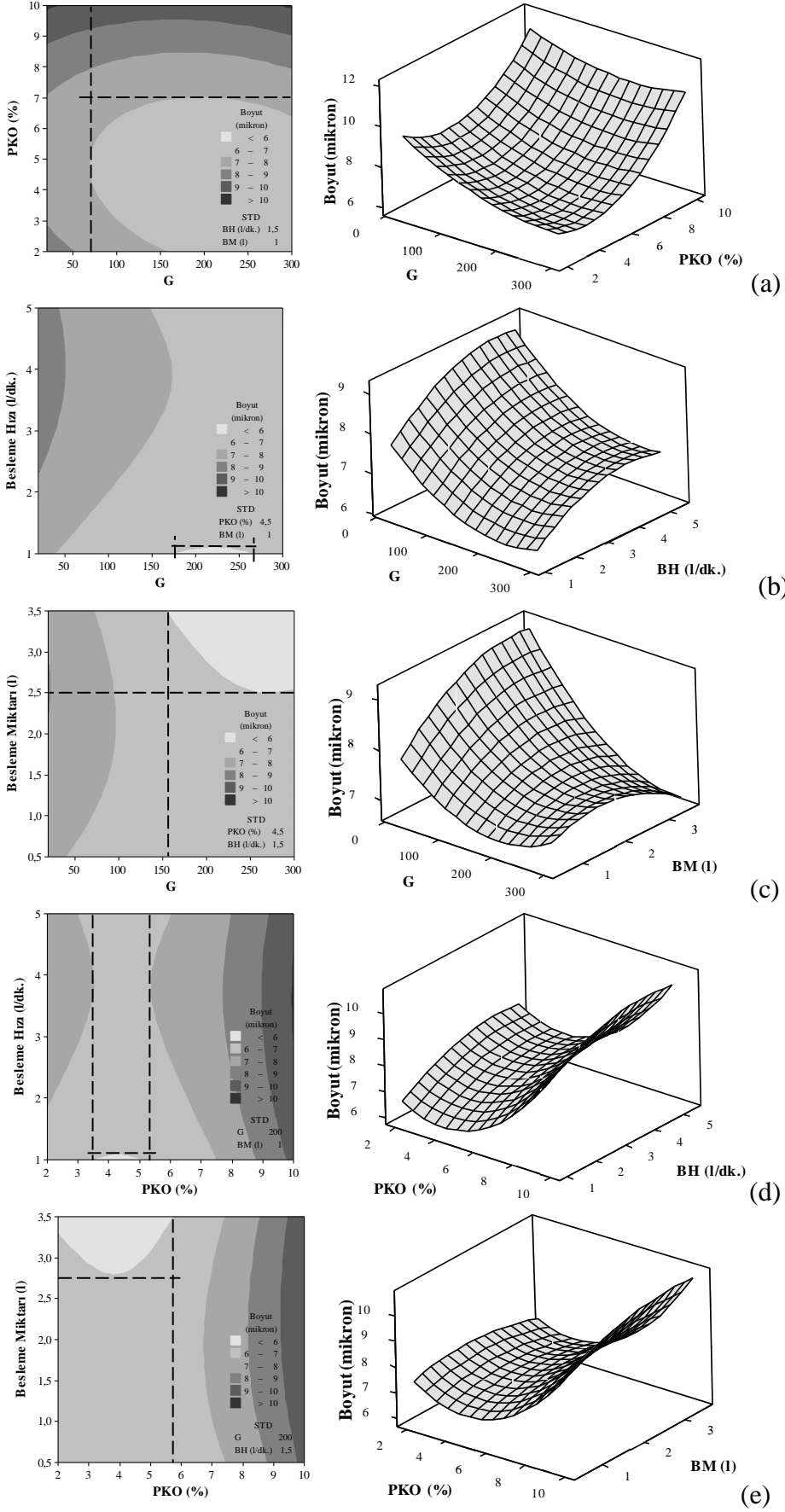
Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve yanıtlar üzerine etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7 :** En iyi ayırma şartlarını sağlayan bağımsız değişkenlerinin en düşük ve en yüksek değerleri.

Kombinasyon	Bağımsız Değişkenler			
	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)
G/PKO	150-300	2-6		
	225-300	4-6		
G/BH	100-300		<1,5	
	275-300		<2	
G/BM	175-250			0,5-0,75
	250-300			<1,5
PKO/BH		2-7	<2,5	
		3,5-7	--	
PKO/BM		3-6		<1
		4,5-6		--
En Yüksek/ En Düşük	100-300	2-7	<2,5	<1,5
STD	200	4,5	1,5	1

Şekil 4.14 (a)’da sabit besleme hızı (1,5 litre/dakika) ve sabit besleme miktarında (1 litre) G ve PKO’nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO’nun  $d_{90}$  boyutuna etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı deneysel bölge içinde durağan bir noktanın (minimum nokta) olduğunu, PKO ve G arasındaki iç etkileşimin önemli olduğunu gösterir. Görüldüğü gibi  $d_{90}$  boyutu durağan noktadan uzaklaştıkça büyür, PKO’nun artması ile 200 G değerinde bir minimumdan geçerek artmaktadır. Kontur grafiğinden görüldüğü üzere, G değeri 75’in üzerinde ve PKO %7’nin altında iken  $d_{90}$  boyutu 6-7 mikron aralığında olmaktadır.

Şekil 4.14(b)’de grafikler, sabit PKO (%4,5) ve sabit besleme miktarında (1 litre), G ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilmiş ve  $d_{90}$  boyutuna etkileri gösterilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme miktarı arasındaki iç etkileşimin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğini göstermektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinden de görüldüğü gibi G’nin değişimi  $d_{90}$  boyutunu daha fazla etkilemektedir. En küçük  $d_{90}$  boyutları, yüksek G değerlerinde elde edilmiştir.



Şekil 4.14 :  $d_{90}$  için G, PKO, besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



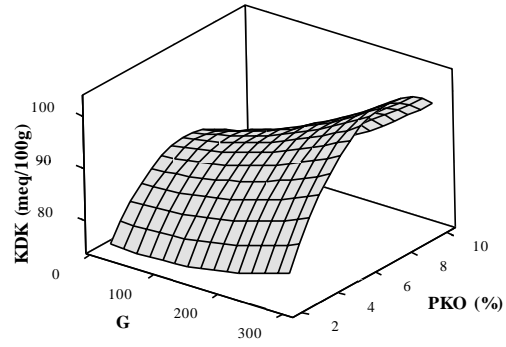
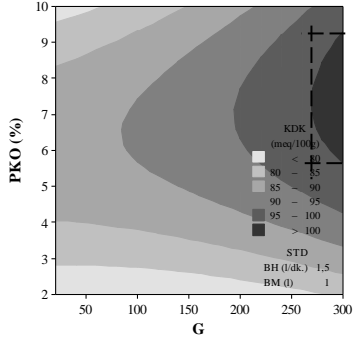
Kontur grafiği incelendiğinde, 6 mikrondan küçük boyutlu bir ürünün 175-275 G aralığında 1,5 litre/dakikadan yavaş besleme hızlarında elde edildiği görülmektedir.

G ve besleme miktarının fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.14 (c)'de verilmiştir. PKO % 4,5 ve besleme hızı 1,5 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiği eyer nokta yapısındadır. Durağan noktanın deneysel bölge içinde olması G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğini ifade etmektedir. Şekil 4.14(b)'de olduğu gibi G değeri  $d_{90}$  boyutu üzerinde daha etkilidir ve en küçük  $d_{90}$  boyutlarına yüksek G değerlerinde ulaşılmıştır. Kontur grafiği, 6 mikrondan küçük boyutlu bir ürünün 150 G üzerinde ve 2,5 litreden fazla besleme miktarlarında elde edilebileceğini göstermektedir.

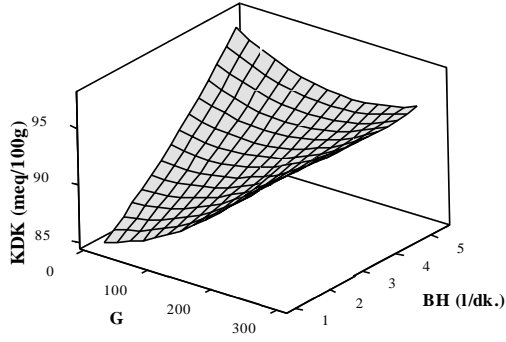
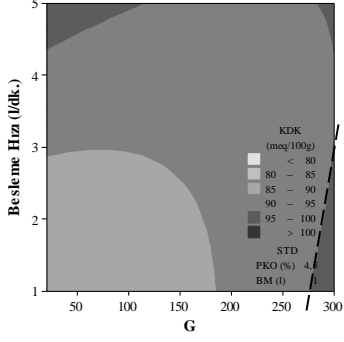
PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.14(d)) G değeri 200 ve besleme miktarı 1 litre olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer yapısı PKO ve besleme hızı iç etkileşiminin  $d_{90}$  boyutunu etkilediğini göstermektedir. Yüksek PKO değerlerinde  $d_{90}$  boyutunun büyüdüğu görülmektedir. En küçük  $d_{90}$  boyutları PKO'nun ve besleme hızının düşük olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de, 6 mikrondan küçük boyutlu bir ürünün 1,5 litre/dakikadan yavaş hızlarda % 3,5-5,5 PKO aralığında elde edilebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.14(e)'de, G değeri 200 ve besleme hızı 1,5 litre/dakika olarak sabit tutularak PKO ve besleme miktarının fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiği Şekil 4.14(d)'ye benzemekte, besleme hızı ile besleme miktarının  $d_{90}$  boyutlarına benzer ve az etkilerinin olduğunu göstermektedir. İki grafik içinde PKO baskın parametredir. Kontur grafiği, 6 mikrondan küçük boyutlu bir ürünün PKO % 6'dan küçük ve esleme miktarı 2,5 litreden fazla olduğunda elde edilmiştir.

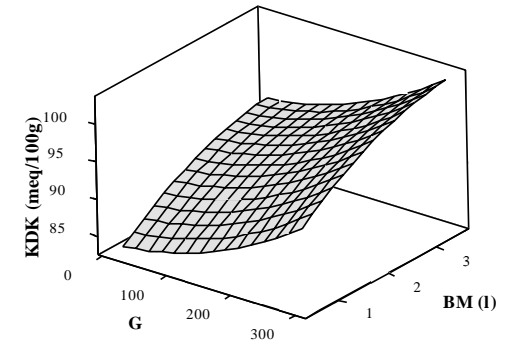
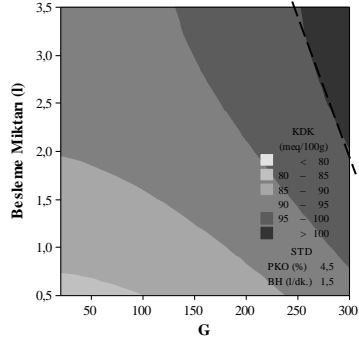
Şekil 4.15 (a)'dan, sabit besleme hızı (1,5 litre/dakika) ve sabit besleme miktarında (1 litre) G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğriler ve değişkenlerin KDK'ya olan etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde G değerinin PKO'dan daha etkin olduğu, KDK değerinin G değerinin artış ve azalışından daha çok etkilendiği görülmektedir. Kontur grafiğinden görüldüğu üzere, G değeri 275'in üzerinde ve PKO % 6-9 arasında iken KDK'sı 100 meq/100 g'dan büyük bir ürün elde edilmektedir.



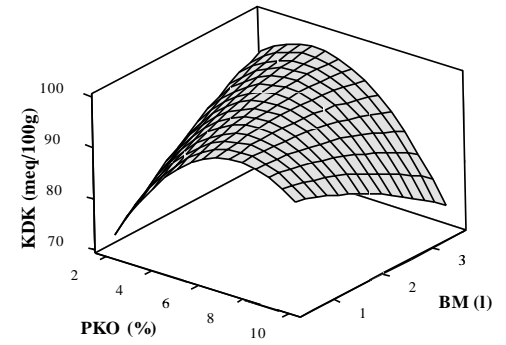
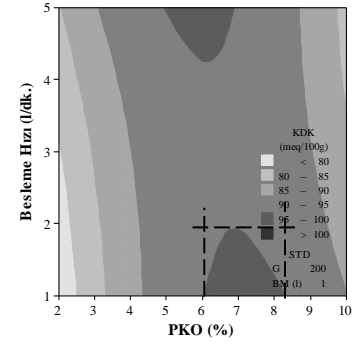
(a)



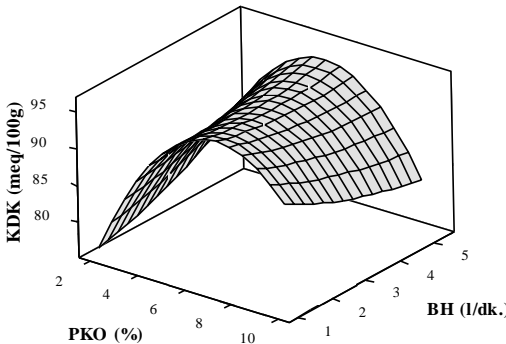
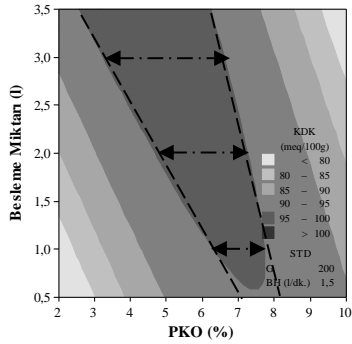
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.15 : KDK için G, PKO, besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.

Şekil 4.15 (b), G ve besleme hızının fonksiyonu olarak PKO'nun % 4,5 ve besleme miktarının 1 litre olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiş grafikler G ve besleme hızının KDK'ya etkilerini göstermektedir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. G ve besleme hızı açısından bakıldığında, G'nin besleme hızından daha fazla etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Kontur grafiğinden ise KDK'sı yüksek ürünlerin 3 litre/dakikadan daha yavaş besleme hızlarında 300 G civarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.15 (c)'de PKO değeri % 4,5 ve besleme hızı 1,5 litre/dakika olarak sabit tutularak G ve besleme miktarının fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölgenin içinde olduğunu ve G ve besleme miktarı arasındaki iç etkileşimlerin KDK'yı etkilediğini göstermektedir. G değerinin ve besleme miktarının artışı KDK'yı olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinden de, KDK'sı 100 meq/100 g'dan büyük bir ürünün 250'den büyük G değerlerinde ve 2 litreden büyük besleme miktarında elde edileceği görülmektedir.

Şekil 4.15 (d)'de sabit G (200) ve besleme hızında (1,5 litre/dakika) PKO ve besleme miktarının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden KDK'ya olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı, durağan noktanın deneysel bölgenin içinde olduğunu ve PKO ve besleme miktarı arasındaki iç etkileşimin KDK'yı etkilediğini göstermektedir. Kontur grafiği, KDK değeri 95-100 meq/100 g olan bir ürün elde etmek için besleme hızının 2 litre/dakikadan yavaş ve PKO'nun % 6-8 aralığında olması gerektiğini göstermektedir.

PKO ve besleme miktarının fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.15 (e)), G değeri 200 ve besleme hızı 1,5 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde PKO'nun daha etkin olduğu, besleme miktarının ise fazla etkin olmadığı görülmektedir. KDK değerini PKO değerinin artış ve azalışından daha çok etkilenmektedir. Kontur grafiğinden, KDK değeri 95-100 meq/100 g olan bir ürün elde etmek için çalışılmak istenen PKO'ya göre besleme hızı ayarlanabilir. Düşük PKO'larda yüksek besleme miktarı, yüksek PKO'larda düşük besleme miktarları uygundur. Örneğin % 6 PKO'da çalışmak istendiğinde besleme miktarı 1 litre olmalıdır.

#### 4.1.5 Zenginleştirmenin optimizasyonu

##### 4.1.5.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon

Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılacak optimizasyon için tüm bağımsız değişkenler için çizilen grafiklerden ayırma şartları tespit edilmiş ve her bir grafik için ortak olan ayırma şartları belirlenmiştir. Optimum zenginleştirme aralıkları olarak, G değerinin 275-300, PKO'nun % 6, besleme hızının 1,5 litre/dakika ve besleme miktarının 2,5-3,5 litre olması gerektiği tesbit edilmiştir (Çizelge 4.8). Bulunan değerler kodlu değerlerine çevrilerek,  $d_{90}$  boyutu için denklem (4.1) ve KDK için denklem (4.2)'de yerine konduğunda elde edilen sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.9'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8 :** Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon.

Kombinasyon	Bağımsız Değişkenler			
	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)
G/PKO	75-300	2-7		
	275-300	6-9		
G/BH	175-300		<1,5	
	275-300		<3	
G/BM	150-300			>2,5
	250-300			>2
PKO/BH		4-6	<1,5	
		6-8	<2	
PKO/BM		2-6		>2,5
		--		--
Optimum	275-300	6	0,5-1,5	2,5-3,5

**Çizelge 4.9 :** Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan  $d_{90}$  ve KDK değerleri.

G	275	275	275	275	300	<b>300</b>	300	300
PKO(%)	6	6	6	6	6	<b>6</b>	6	6
BH (l/dk.)	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	<b>0,5</b>	1,5	1,5
BM	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	<b>3,5</b>	2,5	3,5
$d_{90}$	5,7	5,0	6,5	5,9	5,8	<b>5,0</b>	6,5	5,9
KDK	104	105	101	100	106	<b>107</b>	103	102

Çizelge 4.9'daki sonuçlara göre, en iyi ayırmanın, G değerinin 300, PKO'nun % 6, besleme hızının 0,5 litre/dakika ve besleme miktarının 3,5 litre olduğu koşullarda olduğu belirlenmiştir.

#### 4.1.5.2 Kritik noktanın hesaplanması ile optimizasyon

Denklem (4.1) ve denklem (4.2)'de d90 boyutu ve KDK için tanımlanan model denklemlerinin optimizasyonu denklem (4.3)'teki eşitlikler çözülerek gerçekleştirilmiştir. Kodlanmış seviye değerleri ve bu değerlere karşılık gelen denklem (3.2)'den hesaplanan gerçek değerleri ile elde edilecek yanıt değişkenleri d90 boyutu için Çizelge 4.10'da KDK için Çizelge 4.11'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y_{d90}}{\partial X_1} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{d90}}{\partial X_2} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{d90}}{\partial X_3} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{d90}}{\partial X_4} = 0 \\ \frac{\partial Y_{KDK}}{\partial X_1} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{KDK}}{\partial X_2} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{KDK}}{\partial X_3} = 0 & \quad \frac{\partial Y_{KDK}}{\partial X_4} = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

**Çizelge 4.10 :** Bağımsız değişkenlerin d90 boyutu için optimum şartları.

Bağımsız değişkenler	Sembol	Optimum kod değer	Optimum gerçek değer	d90 boyutu (mikron)	KDK (meq/100 g)
G	$x_1$	1,567	270	7,0	94
PKO (%)	$x_2$	-1,002	4,0		
Besleme hızı (l/dk.)	$x_3$	1,066	4,1		
Besleme miktarı (l)	$x_4$	-0,309	1,8		

**Çizelge 4.11 :** Bağımsız değişkenlerin KDK boyutu için optimum şartları.

Bağımsız değişkenler	Sembol	Optimum kod değer	Optimum gerçek değer	d90 boyutu (mikron)	KDK (meq/100 g)
G	$x_1$	-0,431	130	7,6	93
PKO (%)	$x_2$	-1,038	3,9		
Besleme hızı (l/dk.)	$x_3$	0,570	3,6		
Besleme miktarı (l)	$x_4$	1,343	3,0		

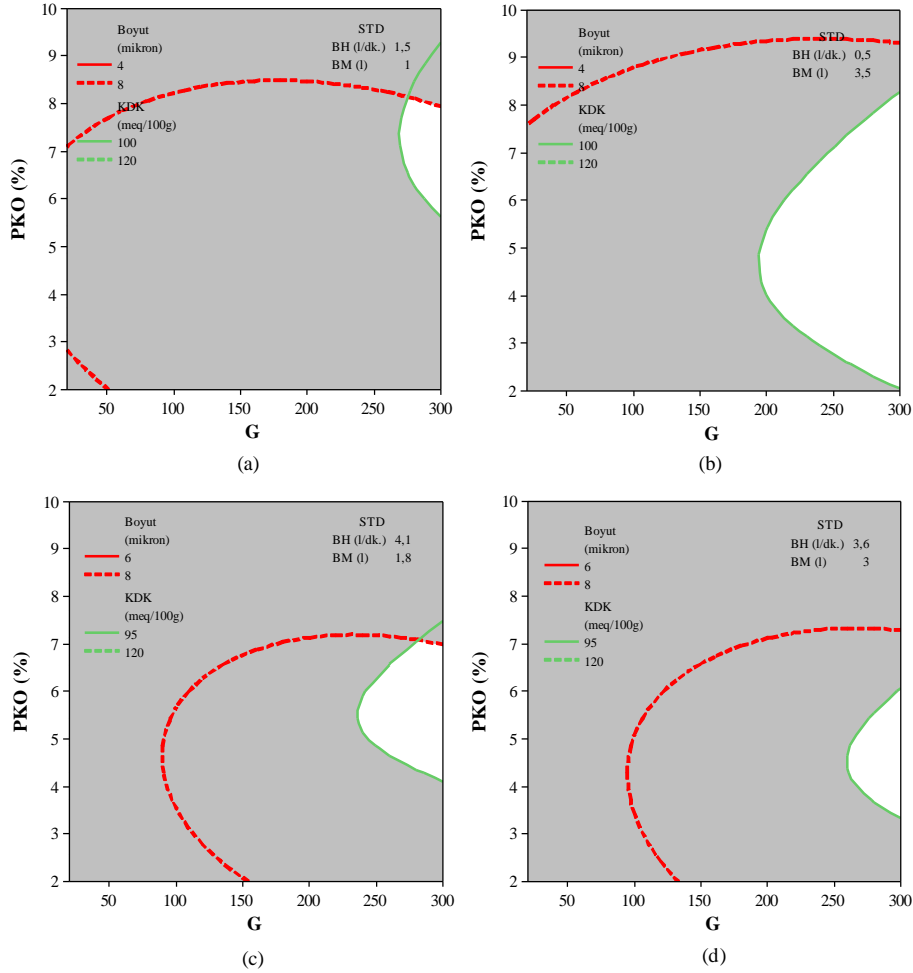
#### 4.1.5.3 Örtüşen kontur grafiği yardımı ile optimizasyon

Örtüşen kontur grafiği ile optimizasyon çalışmalarında yanıt değer aralıkları, kil zenginleştirme için arzu edilen boyut ve KDK değerleri ve Falcon ayırıcısından elde edilebilecek en iyi değerler göz önüne alınarak kararlaştırılmıştır. Bağımsız değişkenler ise daha önce tespit edilen optimum şartlara göre seçilmiş ve toplu olarak Çizelge 4.12'de verilmiştir. Örtüşen kontur grafikleri ise G ve PKO'nun fonksiyonları olarak Şekil 4.16'da, besleme hızı ve besleme miktarının fonksiyonları olarak Şekil 4.17 verilmiştir

Örtüşen grafiklerin kesişim alanları kil zenginleştirme için optimum çalışma koşullarını vermektedir. Örtüşen grafikler yardımı ile kil zenginleştirme için optimum koşullar, Şekil 4.18’den de görülebileceği gibi, G değeri 300, PKO % 6, besleme hızı 1 l/dakika ve besleme miktarı 3 litre olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.12 :** Örtüşen grafik çiziminde yararlanılan bağımsız değişken şartları.

Bağımsız değişkenler	Bağımsız değişken ve yanıt değerleri			
	(a)	(b)	(c)	(d)
G	200	300	270	130
PKO(%)	4,5	6	4,0	3,9
BH (l/dk.)	1,5	0,5	4,1	3,6
BM	1	3,5	1,8	3,0

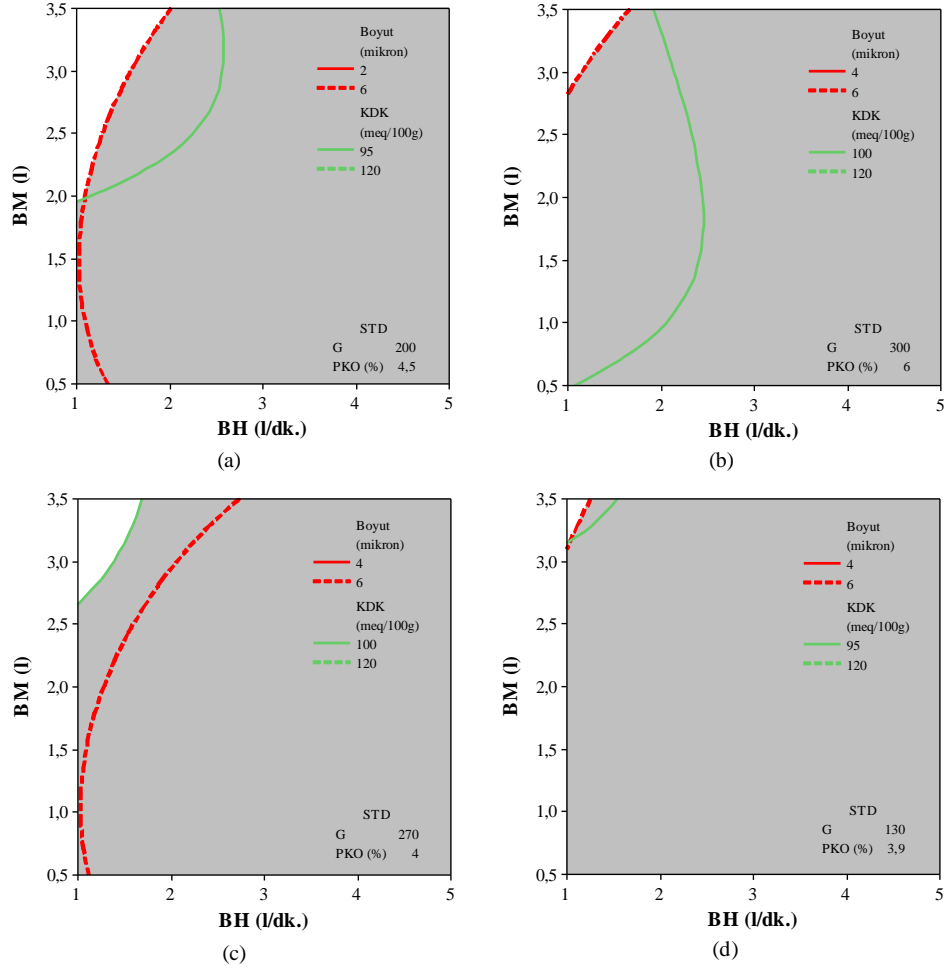


**Şekil 4.16 :** G ve PKO’ya göre çizilen örtüşen kontur grafikleri.

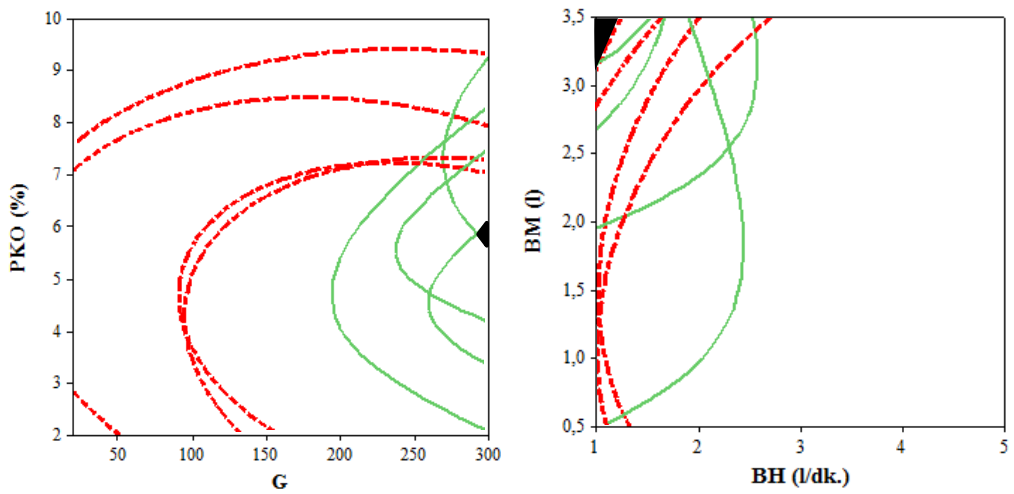
#### 4.1.5.4 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon

Yanıt değişkenlerini belirleyecek olan bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve hedef değerleri verilmiştir. Yanıtların eş zamanlı optimize edilmesi amacıyla kullanılan çekicilik fonksiyonu tüm yanıtları, tek bir fonksiyon altında toplanmış ve

bu fonksiyonun arzu edilen sonuçları verecek şekilde maksimize etmiştir. Yanıt değişkenlerin aldığı değerler Çizelge 4.13'te, çekicilik fonksiyonu ile yapılan optimizasyon sonuçları Çizelge 4.14'te verilmiştir. Önem derecesi her iki yanıt değişkeni için 1 olarak alınmıştır.



Şekil 4.17 : Besleme hızı ve besleme miktarına göre çizilen örtüşen kontur grafikleri.



Şekil 4.18 : Optimum çalışma aralıkları.

**Çizelge 4.13 : Yanıt değişkenlerinin değerleri.**

Yanıt değişkenleri	Düşük	Hedef	Yüksek	Önem
Boyut (mikron)	4	6	8	1
KDK (meq/100g)	95	105	120	1

**Çizelge 4.14 : Çekicilik fonksiyonu ile değişkenlerin optimizasyonu.**

G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)	Boyut (mikron)	Çekicilik	KDK (meq/100g)	Çekicilik	Toplam çekicilik	
YÇ	300	6,8	1,0	3,5	6	1,000	103	0,753	0,868
YÇ	300	6,2	5,0	0,5	7	0,528	99	0,352	0,431
YÇ	300	7,0	3,1	0,5	8	0,190	100	0,467	0,298
YÇ	300	6,5	1,9	0,5	7	0,437	100	0,525	0,479
YÇ	300	5,9	1,0	2,7	6	1,000	105	0,953	0,976
YÇ	300	7,7	5,0	0,8	8	0,022	97	0,228	0,070
YÇ	300	5,8	1,0	1,0	6	0,768	101	0,644	0,704
YÇ	20	6,6	4,7	0,5	8	0,002	96	0,081	0,013
YÇ	20	6,1	4,4	0,5	8	0,032	95	0,020	0,025
YÇ	20	6,0	4,8	0,5	8	0,082	97	0,188	0,124
YÇ	300	6,7	5,0	1,5	8	0,183	96	0,116	0,146
<b>GÇ</b>	<b>300</b>	<b>5,9</b>	<b>1,0</b>	<b>2,7</b>	<b>6</b>	<b>1,000</b>	<b>105</b>	<b>0,953</b>	<b>0,976</b>

YÇ: Yerel çözüm

GÇ: genel çözüm

Sonuç olarak, minimum  $d_{90}$  boyutu (6 mikron) ve maksimum KDK (105 meq/100g) için optimum koşullar, G değeri 300, PKO % 6, besleme hızı 1 litre/dakika ve besleme miktarı 2,7 litre olarak belirlenmiştir.

#### 4.1.6 Zenginleştirmenin ayırma boyutu yönünden irdelenmesi

Falcon ayırıcısının, beslenen malzemeleri ilk olarak yoğunluk farklarına, sonra da boyutlarına göre ayırdığı bilinmektedir (Gee ve diğ., 2005, Majumder ve Barnwal, 2006, Honaker ve diğ., 1995, Abela, 1997, Honaker ve diğ., 1996). Bu olgudan yola çıkarak, Falcon ayırıcısının, aynı yoğunlukta, ancak farklı boyutlarda gang mineralleri içeren killerin boyuta göre sınıflandırılarak zenginleştirilmesinde de kullanılabileceği düşünülmüştür. Ayırmanın daha iyi anlaşılabilmesi için 20 G ve 300 G değerinde beşer deney daha eklenmiştir. Yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilerde bu düşüncüyü doğrular niteliktedir.

Deney seti kapsamında yapılan her bir deney için, bölüm 3.3.4'te boyuta göre ayırmanın değerlendirilmesi kısmında anlatıldığı üzere, dağılım tabloları oluşturulmuş (Çizelge A.3-43) ve eğrileri çizilmiştir (Şekil A.9-49). Bu eğrilerden  $d_{25}$ ,  $d_{50}$  ve  $d_{75}$  boyutları elde edilmiş ve ayırma hassasiyeti ( $I$ ) de denklem (3.3)'teki eşitliğe göre hesaplanmıştır. Elde edilen  $d_{25}$ ,  $d_{50}$  ve  $d_{75}$  boyutları ve hesaplanan ayırma hassasiyeti ( $I$ ) değerleri Çizelge 4.15'te verilmiştir.

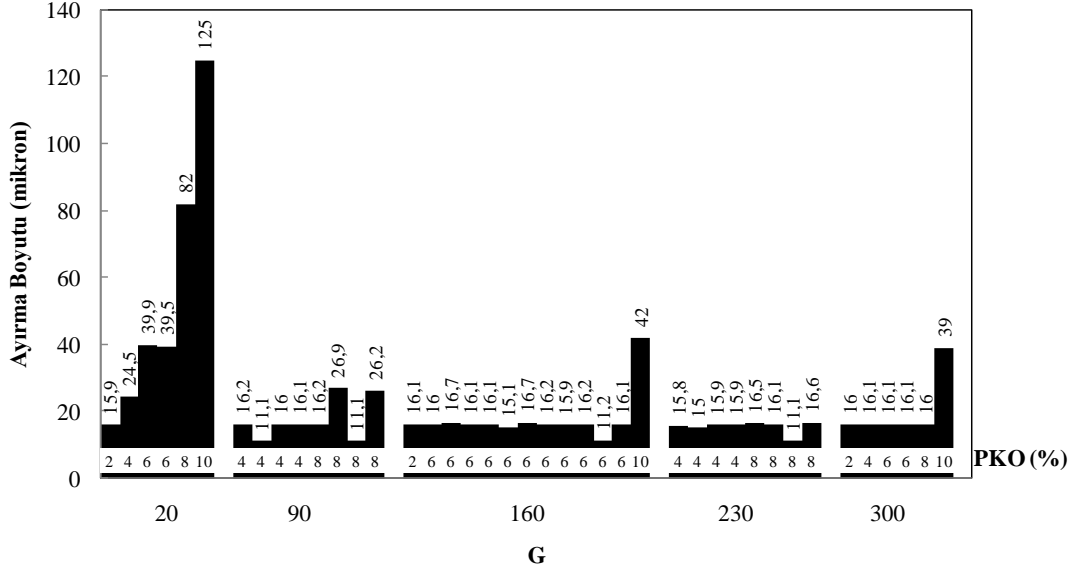


**Çizelge 4.15 :** Kil zenginleştirme deneylerinde farklı koşullarda elde edilen boyut ile ayırma hassasiyeti değerleri.

Deney No	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)	d <sub>25</sub> (µm)	d <sub>50</sub> (µm)	d <sub>75</sub> (µm)	I
32	20	2	3	2	15,9	<b>13,9</b>	11,0	0,176
33	20	4	3	2	24,5	<b>20,5</b>	16,9	0,185
10	20	6	3	2	39,9	<b>34,2</b>	24,0	0,232
34	20	6	3	2	39,5	<b>34,0</b>	26,8	0,187
35	20	8	3	2	82,0	<b>74,1</b>	67,0	0,101
36	20	10	3	2	125,0	<b>92,0</b>	59,0	0,359
1	90	4	2	1,25	16,2	14,9	12,9	0,111
4	90	4	2	2,75	11,1	9,9	8,8	0,116
15	90	4	4	1,25	16,0	14,5	12,0	0,138
6	90	4	4	2,75	16,1	14,8	13,1	0,101
11	90	8	2	1,25	16,2	15,0	13,1	0,103
19	90	8	2	2,75	26,9	<b>23,4</b>	16,9	0,214
22	90	8	4	1,25	11,1	10,0	8,7	0,120
8	90	8	4	2,75	25,4	<b>21,9</b>	17,9	0,171
24	160	2	3	2	16,1	14,3	12,1	0,140
25	160	6	1	2	16,0	14,4	12,1	0,135
23	160	6	3	0,5	16,7	15,2	13,2	0,115
2	160	6	3	2	16,1	14,7	12,5	0,122
12	160	6	3	2	16,1	14,2	11,7	0,155
14	160	6	3	2	15,1	13,1	10,8	0,164
17	160	6	3	2	16,7	15,3	13,8	0,095
18	160	6	3	2	16,2	15,0	13,0	0,107
21	160	6	3	2	15,9	14,1	12,0	0,138
31	160	6	3	2	16,2	14,8	12,9	0,111
5	160	6	3	3,5	11,2	10,0	8,7	0,125
26	160	6	5	2	16,1	14,7	12,7	0,116
13	160	10	3	2	42,0	<b>37,0</b>	30,0	0,162
9	230	4	2	1,25	15,8	14,0	11,9	0,139
27	230	4	2	2,75	15,0	12,4	9,8	0,210
28	230	4	4	1,25	15,9	14,1	11,8	0,145
16	230	4	4	2,75	15,9	14,4	12,9	0,104
20	230	8	2	1,25	16,5	15,1	13,3	0,106
29	230	8	2	2,75	16,1	14,8	12,1	0,135
30	230	8	4	1,25	11,1	10,0	8,8	0,115
7	230	8	4	2,75	16,6	15,5	14,0	0,084
37	300	2	3	2	16,0	14,4	12,3	0,128
38	300	4	3	2	16,1	14,9	12,2	0,131
3	300	6	3	2	16,1	14,3	12,2	0,136
39	300	6	3	2	16,1	14,6	12,3	0,130
40	300	8	3	2	16,0	14,5	13,0	0,103
41	300	10	3	2	39,0	<b>32,5</b>	25,0	0,215

Bilindiği gibi kil, 2 mikron ve daha küçük tanelerden meydana gelmektedir (Grim, 1968, Grim ve Güven, 1978) ve kil zenginleştirmede de ana amaç bu boyuta ulaşmaktır. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.19'dan da görülebileceği gibi, G değerinin artması ile ayırma boyutu (d<sub>50</sub>) küçülmekte, laboratuvar tipi Falcon L40 ayırıcısının kesme boyutu olan 10 mikron değerine yaklaşılmaktadır (Operations and

Maintenance Manual, 2006). 20 G’de yapılan deneylerde 14-92 mikron arasında değişen  $d_{50}$  boyutu, G değeri 90, 160, 230 ve 300 iken ortalama 14-15 mikron olmaktadır.



Şekil 4.19 : Toplu sonuçlar.

Şekil A.9-A.49’da çizilmiş olan dağılım eğrilerinden de görüldüğü üzere, yüksek G veya düşük PKO değerlerinde ayırma eğrileri dike yakın çıkmıştır. G değerinin 160, 230 ve 300 ve PKO değerlerinin %2, 4, 6 ve 8 olarak alındığı deneylerden elde edilen boyut dağılımlarına göre çizilen dağılım eğrilerin eğimleri, ideal eğriye göre, “0”a yakın yani ideal eğri ile aynı diklikte çıkmıştır. Bu dikliğin anlamı yapılan ayırmaların mükemmel yakın olmalarıdır. Ancak G değerinin düşük, yani 20 değerinde olduğu ayırmalarda, ayırma eğrisinin eğimi artmış ve ideal ayırma eğrisi ile arasındaki alan büyümüşür (Şekil A.40, Şekil A.41, Şekil A.18, Şekil A.42, Şekil A.43, Şekil A.44). Eğimin artışı ve alanın büyümesi ayırmanın kötüleştiği, dolayısı ile  $d_{50}$  boyutunun büyüdüğü anlamına gelmektedir.

Kil zenginleştirme deneylerinde, yüksek PKO değerlerinde ayırma boyutu ( $d_{50}$ ) büyümekte ve ayırma olumsuz yönde etkilenmektedir. 160 G’de, % 2 ve % 6 PKO’larda yapılan deneylerde 14-15 mikron arasında olan ortalama  $d_{50}$  boyutu, PKO %10’a çıktığında 37 mikron olmuştur. Aynı şekilde, 300 G’de, PKO %10 un altında yapılan deneylerde elde edilen  $d_{50}$  boyutları 14 mikron civarında iken PKO %10’da 32,5 mikron olmuştur. Düşük PKO değerlerinde ise G, 20 gibi çok düşük bir değerde olduğunda bile istenilen ayırma boyutuna yaklaşılmıştır. 20 G’de % 2 PKO’da ayırma boyutu 13,9 olarak tespit edilmiştir. PKO’nun artışı ile  $d_{50}$  boyutları artmış,

PKO % 4'te 20,5 mikron, % 6'da 34,2 mikron, %8'de 74,1 mikron ve %10 da 92,0 mikron olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.15'ten de görüldüğü gibi, besleme hızının, boyuta göre sınıflandırma ile zenginleştirmeye gözle görülür bir etkisi olmamakla birlikte, besleme miktarının azda olsa etkisi gözlemlenmiştir. Bu etki, santrifüj kuvvetin tanelerin ayrılmasına daha az etki ettiği 90 G'de yapılan ayırmalarda daha belirgin olmaktadır. 90 G ve % 8 PKO'da yapılan deneylerde besleme hızından bağımsız olarak, besleme miktarının artışı  $d_{50}$  boyutunda olumsuz bir etki yarattığı görülmektedir. 2,75 litre miktarında besleme yapılan deneylerde, besleme hızı 2 litre/dakika olduğunda  $d_{50}$  boyutu 23,4 mikron, besleme hızı 4 litre/dakika olduğunda ise 21,9 mikron olarak bulunmuştur.

Yapılan deneylerin toplu sonuçları Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüksek G değerlerinde PKO'un belirli bir değeri geçmesi ayırmayı olumsuz etkilemektedir. 90 G için % 8 PKO ayırmayı olumsuz etkilerken, G kuvvetinin artması ile ancak % 10 PKO'da ayırma kötüleşmektedir.

Yapılan deneylerden, PKO'nun artmasının ayırmayı olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Bu durum 20 G değerinde yapılan deneylerin dağılım eğrilerinden açıkça görülmektedir. PKO arttıkça eğimin, dolayısı ile ideal eğri ile arasındaki alanın da arttığı Şekil A.41, Şekil A.18, Şekil A.42, Şekil A.43ve Şekil A.44'te açıkça görülmektedir. Ayrıca aynı durum 160 ve 300 G değerinde %10 PKO'da yapılan deneylerin dağılım eğrilerinde de görülmektedir (Şekil A.21ve Şekil A.49). Daha düşük PKO değerlerinde, uygulanan santrifüj kuvveti boyuta göre sınıflandırma için yeterli olurken, PKO %10'da ayırma kötüleşmiştir.

Besleme hızının olumsuz etkisi ise Çizelge A.21 ve Çizelge A.10'de görülmektedir. Besleme miktarının artışı dağılım eğrisinin eğimini artırmıştır.

Dağılım tablolarında, ideal ayırmadan sapma olarak aşağıda belirtilen deneylerin sonuçları örnek olarak verilebilir. 20 G'de PKO %4, 6, 8 ve 10'da gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ürünlere yapılan boyut ölçümleri sonucunda, ince malzemede ortalama ayırma boyutu olan 15 mikrondan iri malzeme miktarının sırası ile % 1,2, % 3,2, % 8,8 ve % 12,1 olduğu belirlenmiştir (Çizelge A.35-A.38). Benzer şekilde 160 G ve %10 PKO'da yapılan deneyde, 15 mikrondan iri malzeme miktarının %5,0 (Çizelge A.15), 300 G ve %10 PKO'da yapılan deneyde ise %4,1 (Çizelge A.43) olduğu görülmektedir.

Genel olarak, yukarıda belirtilen şartlar dışında, Falcon ayırıcısı ile yapılan ayırmaların mükemmelere yakın olduğu, ince malzemede iri malzemenin bulunmadığı, ancak az bir miktarda da olsa iri malzeme içinde ince malzeme kaldığı anlaşılmıştır. Dağılım eğrileri ile ideal ayırma eğrileri arasındaki alanlardan, alttaki alanın yok denecek kadar küçük ve üstteki alanın ise çok az olması bu sonuçları doğrular niteliktedir.

Falcon ayırıcısının, mineraller arası özgül ağırlık farkı varsa, özgül ağırlığa göre, yoksa boyuta göre ayırma yaptığı, aynı yoğunluklardaki minerallerin ayrılmasında, bir boyuta göre ayırma cihazı gibi çalıştığı yapılan deneylerle anlaşılmıştır.

## 4.2 Kömür Zenginleştirme Deneyleri ve Modellemeleri

### 4.2.1 Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi ve modellemesi

Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirme deneyleri Çizelge 3.6'da verilen bağımsız değişkenler ve aralıkları için MKT ile belirlenen deney sistematığına göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel yanıtlar olarak seçilen ısı değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi ve kül uzaklaştırma oranının gerçek değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir.

#### 4.2.1.1 Isıl değer için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan ısı değeri ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.4).

$$\begin{aligned} Y_{ID} = & 5115,41 - 24,21X_1 - 62,57X_2 + 53,21X_3 - 15,32X_4 - 538,32X_5 - 29,58X_1^2 \\ & + 17,29X_2^2 - 0,67X_3^2 + 13,42X_4^2 - 49,71X_5^2 + 0,81X_1X_2 - 14,31X_1X_3 \\ & + 34,56X_1X_4 - 2,81X_1X_5 - 26,62X_2X_3 + 63,06X_2X_4 - 101,06X_2X_5 \\ & - 14,85X_3X_4 - 6,44X_3X_5 - 15,31X_4X_5 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.4) model katsayılarına göre incelendiğinde, ısı değeri en fazla etkileyen bağımsız değişkenin kül içeriği olduğu görülmektedir. Bunu PKO ve tane boyutu takip etmektedir. G değerinin ve besleme hızının ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Isıl değer modeli için, kül içeriği, PKO, G ve besleme hızı sistemi negatif etkilerken tane boyutunun etkisinin ise pozitif olduğu görülmektedir. Kül içeriği, PKO, G ve besleme hızının artması ısı değerinin düşmesine, tane boyutunun büyümesi ise ısı

değerin artmasına neden olmaktadır. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

**Çizelge 4.16 :** Yüksek kül içerikli kömür ile yapılan zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların gerçek değerleri.

Deney no	Bağımsız değişkenler					Yanıt değişkenleri			
	G	PKO (%)	B (mm)	BH (l/dk.)	Kİ (%)	ID (kcal/kg)	YV (%)	TKV (%)	KUO (%)
1	250	15	0,212	1,25	40	4768	85,97	73,40	46,04
2	200	25	0,038	2,0	30	5023	94,86	88,56	24,82
3	200	25	0,150	3,5	30	5260	94,17	86,43	28,89
4	250	35	0,212	1,25	20	5588	95,77	90,70	30,63
5	150	35	0,106	1,25	20	5609	95,87	91,30	27,64
6	200	45	0,150	2,0	30	4988	94,54	87,09	28,73
7	200	25	0,150	2,0	30	4966	93,23	85,71	31,11
8	200	25	0,150	2,0	50	3864	88,59	75,93	37,98
9	150	35	0,212	1,25	40	4444	91,35	81,07	35,12
10	200	25	0,300	2,0	30	5236	91,73	85,03	30,30
11	150	35	0,212	2,75	20	5694	96,11	91,14	29,69
12	200	25	0,150	2,0	30	5141	93,32	85,59	32,86
13	250	35	0,212	2,75	40	4394	92,80	83,48	30,84
14	150	15	0,106	1,25	40	4720	88,58	76,92	41,96
15	250	35	0,106	1,25	40	4305	92,95	83,58	30,25
16	250	15	0,106	1,25	20	5491	90,43	86,01	32,81
17	250	15	0,106	2,75	40	4499	89,90	80,07	35,83
18	150	15	0,106	2,75	20	5325	91,20	87,81	26,59
19	200	25	0,150	2,0	10	5991	95,98	95,09	12,37
20	200	25	0,150	2,0	30	5180	92,93	85,95	30,03
21	200	25	0,150	0,5	30	5100	91,28	81,88	37,07
22	150	15	0,212	2,75	40	4575	87,18	75,90	41,65
23	150	35	0,106	2,75	40	4338	93,92	85,91	25,73
24	200	25	0,150	2,0	30	5131	92,58	84,60	32,10
25	200	25	0,150	2,0	30	5090	93,28	85,40	30,11
26	200	25	0,150	2,0	30	5058	93,35	83,83	32,86
27	200	5	0,150	2,0	30	5403	81,40	72,48	46,49
28	100	25	0,150	2,0	30	5092	91,79	82,48	33,91
29	250	35	0,106	2,75	20	5716	96,20	90,95	29,96
30	300	25	0,150	2,0	30	4924	93,67	85,91	29,42
31	150	15	0,212	1,25	20	5744	92,78	87,58	33,40
32	250	15	0,212	2,75	20	5511	93,54	88,51	32,59

Kİ: Kül içeriği (%)

ID: Isıl değer (kcal/kg)

YV: Yanabilir verim (%)

TKV : Temiz kömür verimi (%)

KUO : Kül uzaklaştırma oranı (%)

### Varyans Analizi (ANOVA)

Isıl değer için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Modelin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.17’den görüldüğü gibi, model F değeri 39,23 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2’den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{hesaplanan} > F_{çizelge}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

**Çizelge 4.17 : Isıl değer modeli için varyans analizi (ANOVA).**

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regression</b>	<b>20</b>	<b>7447736</b>	<b>372387</b>	<b>39,23</b>	<b>0,000</b>
G	1	10965	12917	1,36	0,268
PKO	1	78776	86262	9,09	0,012
B	1	52450	52832	5,57	0,038
BH	1	3675	5173	0,54	0,476
Kİ	1	6921930	6384256	672,60	0,000
G <sup>2</sup>	1	23918	25233	2,66	0,131
PKO <sup>2</sup>	1	11911	8626	0,91	0,361
B <sup>2</sup>	1	596	11	0,00	0,973
BH <sup>2</sup>	1	9785	5194	0,55	0,475
Kİ <sup>2</sup>	1	71249	71249	7,51	0,019
G*PKO	1	11	11	0,00	0,974
G*B	1	2164	2164	0,23	0,642
G*BH	1	19113	19113	2,01	0,184
G*Kİ	1	127	127	0,01	0,910
PKO*B	1	7492	7492	0,79	0,393
PKO*BH	1	63630	63630	6,70	0,025
PKO*Kİ	1	163418	163418	17,22	0,002
B*BH	1	2333	2333	0,25	0,630
B*Kİ	1	439	439	0,05	0,834
BH *Kİ	1	3752	3752	0,40	0,542
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>104410</b>	<b>9492</b>		
Uyum eksikliği	6	75741	12623	2,20	0,202
Saf hata	5	28669	5734		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>7552146</b>			

#### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Isıl değer modeli için elde edilmiş olan P değeri ( $< 0,001$ )  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

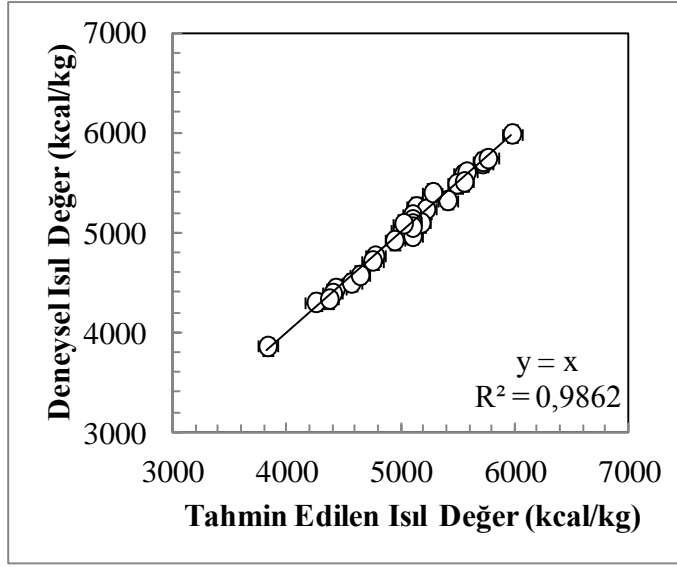
Çizelge 4.17'den,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak ısıl değer üzerinde etkin olan parametrelerin PKO, B, Kİ, Kİ<sup>2</sup>, kodlu değerleri ile verilen PKO, tane boyutu, kül içeriği olduğu görülmektedir. P, F ve katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin kül içeriği olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra PKO ve tane boyutu gelmektedir. G ve besleme hızının etkileri ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. Kül içeriği ve PKO ile yanıt arasında negatif doğrusal etki, tane boyutu ile

yanıt arasında ise pozitif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, kül içeriği ve PKO arttıkça ısı değerini azalacağı, tane boyutunun büyümesinin ise ısı değerini artıracaktır. Kül içeriğinin yanıt üzerinde hem negatif kuadratik etkisi hem de PKO ile negatif etkileşimi vardır. Negatif kuadratik etki sebebi ile kül içeriğinin artışı ile ısı değeri azalacaktır. PKO ile olan kesişim etkisi ise kül içeriğinin azalışı ve PKO'nun artışı sonucu ısı değerini maksimum değere ulaştıracaktır.

Isı değer modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.18'de verilmiştir. Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen ısı değer modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.20'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere ısı değeri için  $R^2$  değeri 0,9862 olarak belirlenmiştir. Isı değer model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kül içeren kömürü zenginleştirme işleminin % 98,62'sini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,96, korelasyon katsayısı 0,993, standart sapma ise 97,4 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında çok iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.18 :** Isı değeri için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney No	Isı Değeri (kcal/kg)			Deney No	Isı Değeri (kcal/kg)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	4768	4772	-4	17	4499	4562	-63
2	5023	5006	17	18	5325	5408	-83
3	5260	5132	128	19	5991	5974	17
4	5588	5547	41	20	5180	5100	80
5	5609	5575	34	21	5100	5176	-76
6	4988	5059	-71	22	4575	4639	-64
7	4966	5100	-134	23	4338	4369	-31
8	3864	3828	36	24	5131	5100	31
9	4444	4425	19	25	5090	5100	-10
10	5236	5219	17	26	5058	5100	-42
11	5694	5714	-20	27	5403	5279	124
12	5141	5100	41	28	5092	5022	70
13	4394	4399	-5	29	5716	5716	0
14	4720	4749	-29	30	4924	4941	-17
15	4305	4251	54	31	5744	5762	-18
16	5491	5489	2	32	5511	5553	-42



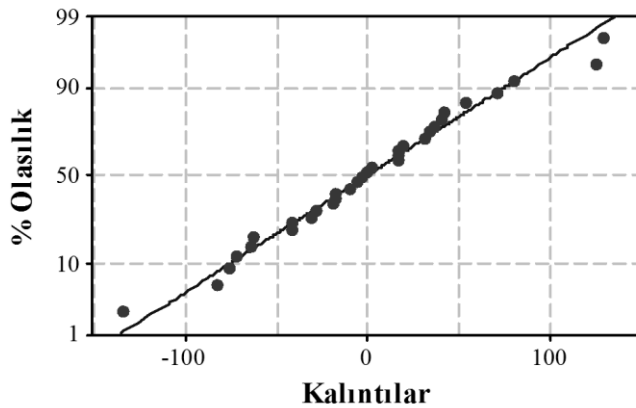
**Şekil 4.20 :** Isıl değer için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

### Model uygunluk testleri

Katsayılarından sonra modelin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılar da test edilmiştir.

### Normalite varsayımı

Şekil 4.21’de kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrilerinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.



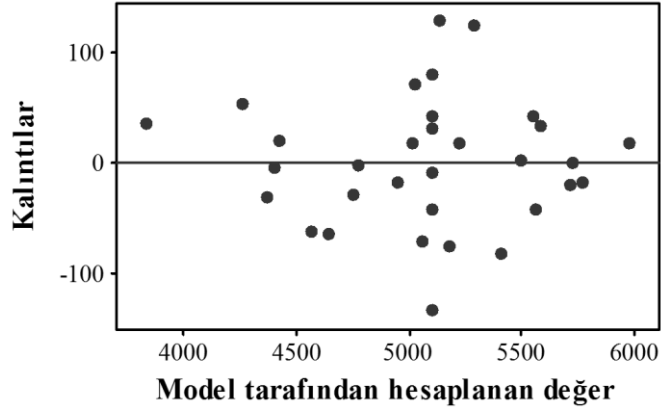
**Şekil 4.21 :** Isıl değer için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

Şekil 4.22’de hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz



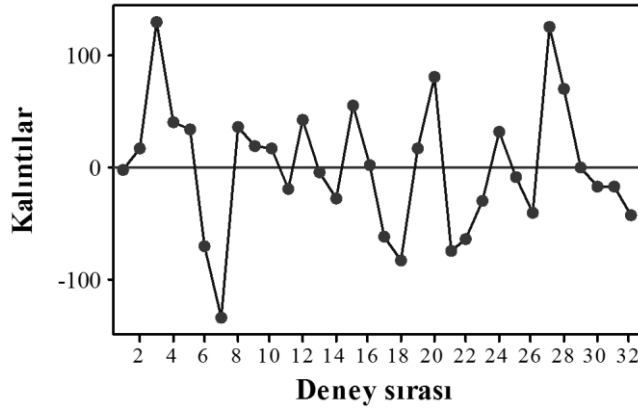
konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.22 : Isıl değer için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

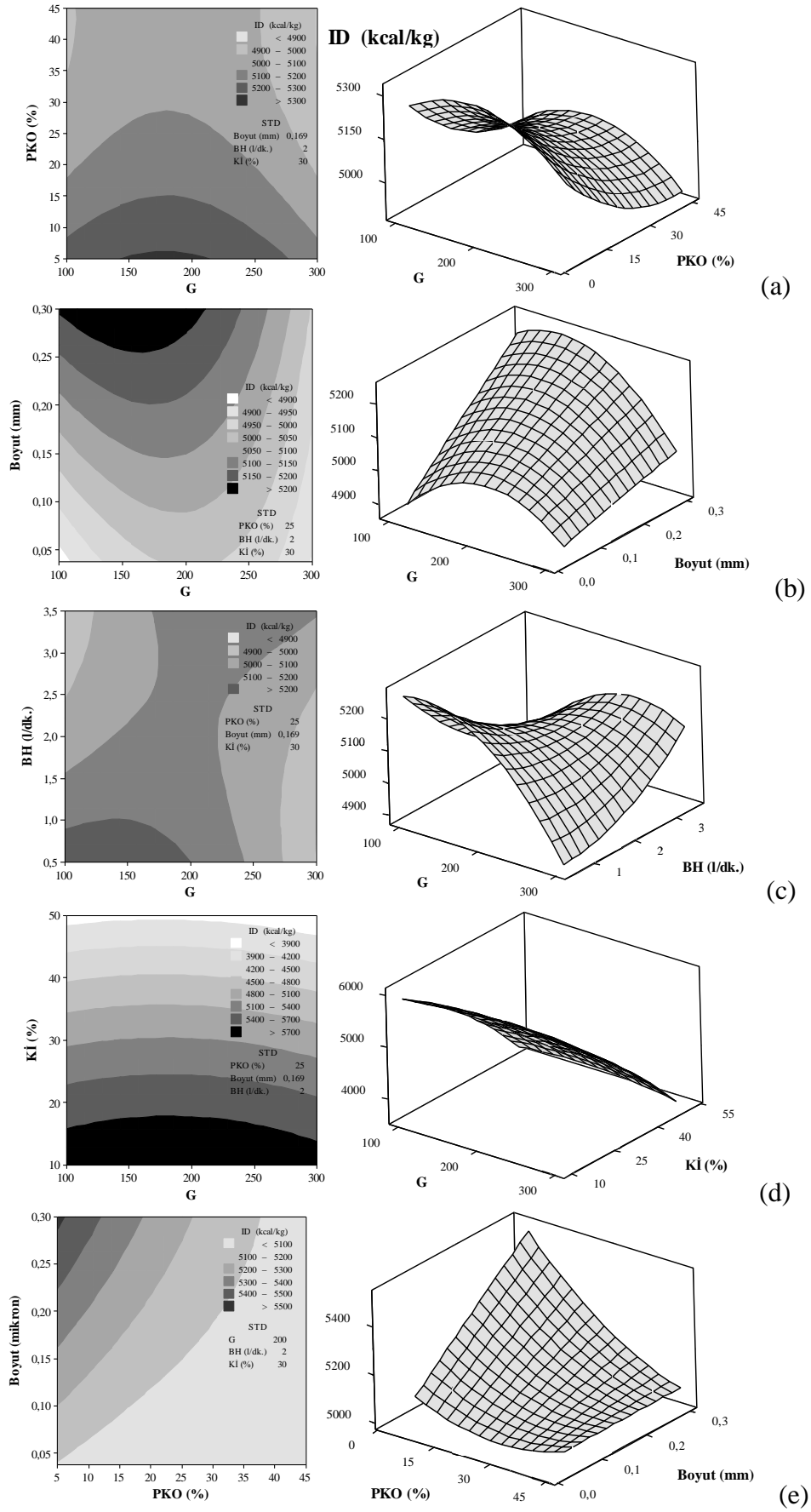
Şekil 4.23’de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir



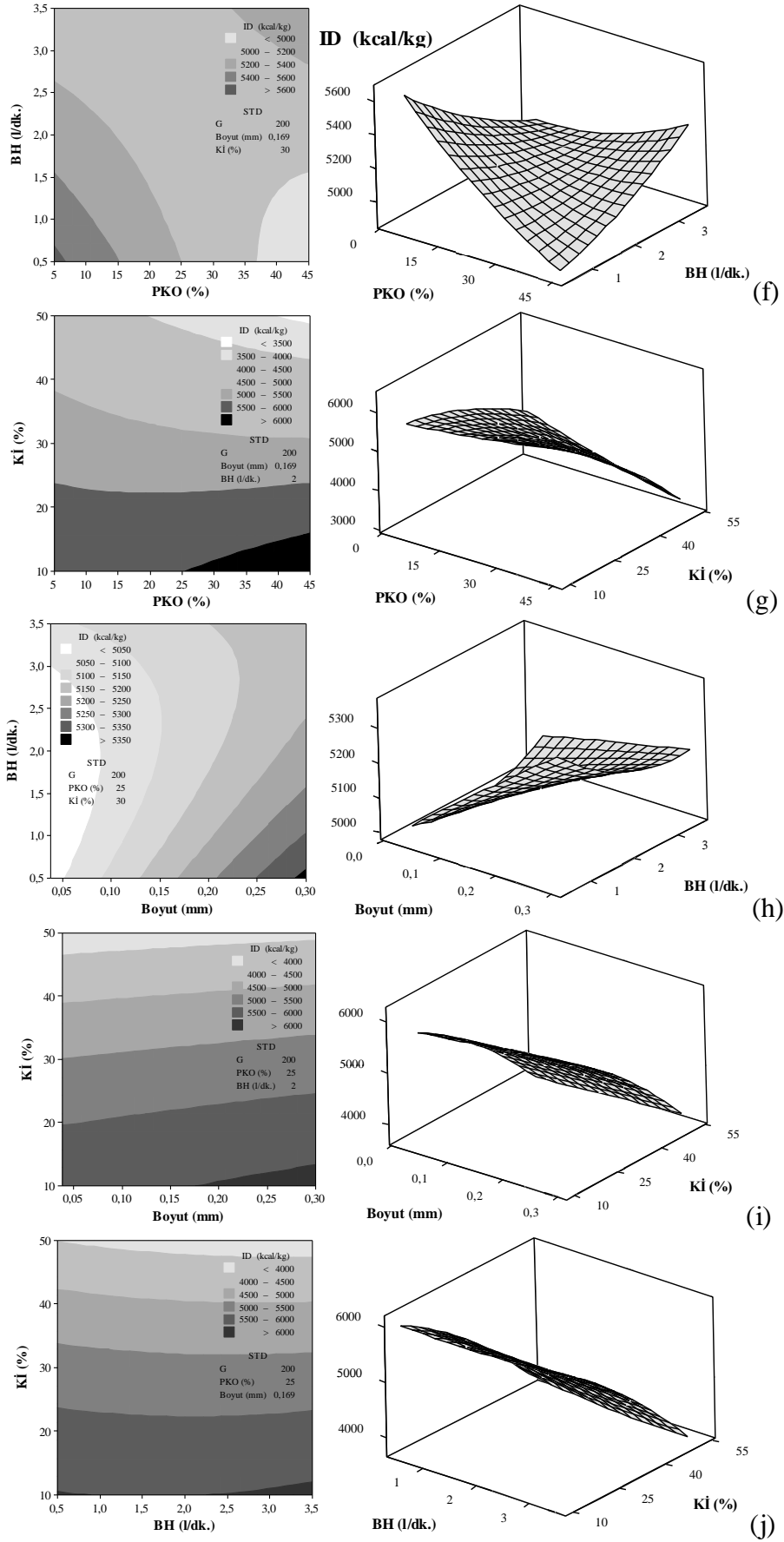
Şekil 4.23 : Isıl değer için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

### Bağımsız Değişkenlerin Zenginleştirmeye Etkileri

Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.7’de verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve yanıtlar üzerine etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.24’te verilmiştir.



Şekil 4.24 : Isıl değer için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



Şekil 4.24 : Isıl değer için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri (devam).

Şekil 4.24 (a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO'nun ısıl değere etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve PKO arasındaki iç etkileşimin ısıl değeri etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak ısıl değerinde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, PKO baskın olan parametredir. Model denkleminde de PKO için belirlenen katsayının G'nin katsayısından büyük olması bu durumu desteklemektedir. Yüksek PKO'larda G'nin değişimi ısıl değeri etkilememektedir. Ancak G'nin orta seviyelerde(150-200), PKO'nun ise düşük olduğu (% 5-25) durumlarda ısıl değer artmaktadır. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, en yüksek ısıl değere % 15 PKO'nun altında ve 100-275 G aralığında ulaşılmaktadır.

G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.24 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder.

Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde ısıl değerinin G değişiminden daha fazla etkilendiği görülür. G değerinin artışı önce ısıl değeri artırmakta, belirli bir seviyede maksimum olduktan sonra G değerindeki devam eden artış ısıl değerinin düşmesine sebep olmaktadır. Kontur grafiğinden ise ısıl değeri yüksek ürünlerin 100-200 G aralığında 250 mikrondan büyük tane boyutlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.24 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kül içeriğinin % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin ısıl değeri etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak ısıl değerinde artma ya da azalma görülmektedir. Yüksek besleme hızlarında ısıl değerinin düştüğü görülmektedir. En yüksek ısıl değerler G değerinin ve besleme hızının düşük olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de 5200 kcal/kg'lık bir kömürün 100-200 G aralığında 1 litre/dakika ve daha düşük besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.24 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve ısıl değerdeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak kül içeriğinin değişimi ile değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de en yüksek ısıl değere sahip ürünlerin % 15'ten az kül içeriğinde elde edilebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.24 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden ısıl değere olan etkiler görülmektedir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. PKO'nun azalışı ve tane boyutunun artışı ısıl değeri olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinden de, en yüksek ısıl değere sahip ürünlerin % 15'ten düşük PKO ve 212 mikrondan büyük tane boyutlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kül içeriğinde (% 30), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının ısıl değere etkileri görülmektedir (Şekil 4.24 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin ısıl değeri etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak ısıl değerinde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. En iyi ısıl değer sonuçları düşük PKO ve besleme hızlarında elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, 5400 kcal/kg'dan büyük ısıl değerler % 15 PKO'dan ve 1,5 litre/dakika besleme hızından düşük çalışma koşullarında elde edilebilir.

PKO ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.24 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve ısıl değerdeki değişimlerin PKO değerinden bağımsız olarak kül içeriğinin değişimi ile değiştiğini göstermektedir. Model denkleminde kül içeriğinin oldukça yüksek olan katsayısı etkisinin diğer tüm parametrelerden çok daha fazla olduğunu göstermekte ve diğer parametreler kül içeriği grafiklerinde etkisiz gibi gözükmektedirler. Kontur grafiğinden de 5500 kcal/kg'dan büyük ısıl değere sahip ürünlerin % 20'den az kül içeriğinde elde edildiğini göstermektedir. Isıl

değerin 6000 kcal/kg'a çıkması ise beslenen kül içeriğinin % 15, PKO'nun %25'in üzerinde olması ile elde edilebilir.

Şekil 4.24 (h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Tane boyutu ve besleme hızı açısından bakıldığında, tane boyutunun besleme hızından daha fazla etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Tane boyutunun artışına bağlı olarak elde edilen ısı değer artmaktadır. Kontur grafiğinden de 5330 kcal/kg'dan büyük ısı değerli kömür için 250 mikron üzerinde 1 litre/dakikadan yavaş besleme hızlarında çalışılması gerektiği görülmektedir.

Şekil 4.24 (i) ve Şekil 4.24 (j)'de görülen grafikler, tane boyutu ile kül içeriği ve besleme hızı ile kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilmiştir. İki grafikte kül içeriğinin etkisi dolayısı ile durağan sırt yapısındadır ve ısı değer kül içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Kontur grafiklerinden 5500 kcal/kg'dan büyük ısı değerlerin % 20 kül içeriğinde elde edilebileceği, daha büyük ısı değer için tane boyutunun 200 mikrondan, besleme hızının ise 2,5 litre/dakikadan büyük olması gerektiği görülmektedir.

#### 4.2.1.2 Yanabilir verim için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan yanabilir verimi ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.5).

$$\begin{aligned} Y_{YV1} = & 92,9073 + 0,1859X_1 + 2,5195X_2 - 0,4474X_3 + 0,5403X_4 - 2,0248X_5 \\ & + 0,0379X_1^2 - 1,1522X_2^2 + 0,1460X_3^2 + 0,0368X_4^2 - 0,0736X_5^2 \\ & + 0,0241X_1X_2 + 0,0262X_1X_3 + 0,4681X_1X_4 + 0,0374X_1X_5 - \\ & 0,2486X_2X_3 - 0,0606X_2X_4 + 0,2123X_2X_5 + 0,0110X_3X_4 - 0,9587X_3X_5 \\ & + 0,1710X_4X_5 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.5) model katsayılarına göre incelendiğinde, yanabilir verimi en fazla etkileyen bağımsız değişkenin PKO ve kül içeriği olduğu görülmektedir. Bunu besleme hızı ve tane boyutu takip etmektedir. G değerinin ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Yanabilir verim modeli için, PKO, besleme hızı ve G değeri sistemi pozitif

etkilerken kül içeriği ve tane boyutunun etkisi ise negatif olduğu görülmektedir. PKO, besleme hızı ve G değerinin artması yanabilir verimin artmasına sebep olmaktadır. Kül içeriğinin artışı ve tane boyutunun büyümesi ise yanabilir verimi düşürmektedir. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

### Varyans Analizi (ANOVA)

Yanabilir verim için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.19'da verilmiştir.

**Çizelge 4.19 : Yanabilir verim modeli için varyans analizi (ANOVA).**

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	<b>307,924</b>	<b>15,396</b>	<b>14,13</b>	<b>0,000</b>
G	1	0,784	0,762	0,70	0,421
PKO	1	158,381	139,853	128,40	0,000
B	1	4,014	3,735	3,43	0,091
BH	1	6,948	6,430	5,90	0,033
Kİ	1	80,770	90,321	82,92	0,000
G <sup>2</sup>	1	0,301	0,041	0,04	0,849
PKO <sup>2</sup>	1	40,725	38,282	35,15	0,000
B <sup>2</sup>	1	0,618	0,550	0,50	0,492
BH <sup>2</sup>	1	0,056	0,039	0,04	0,853
Kİ <sup>2</sup>	1	0,156	0,156	0,14	0,712
G*PKO	1	0,009	0,009	0,01	0,928
G*B	1	0,007	0,007	0,01	0,936
G*BH	1	3,506	3,506	3,22	0,100
G*Kİ	1	0,022	0,022	0,02	0,888
PKO*B	1	0,654	0,654	0,60	0,455
PKO*BH	1	0,059	0,059	0,05	0,821
PKO*Kİ	1	0,721	0,721	0,66	0,433
B*BH	1	0,001	0,001	0,00	0,973
B*Kİ	1	9,721	9,721	8,93	0,012
BH *Kİ	1	0,468	0,468	0,43	0,526
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>11,981</b>	<b>1,089</b>		
Uyum eksikliği	6	11,524	1,921	21,00	0,002
Saf hata	5	0,457	0,091		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>319,906</b>			

Modelin geçerliliğini test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.19'dan görüldüğü gibi, model F değeri 14,13 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{çizelge}}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Yanabilir verim modeli için elde edilmiş olan P değeri ( $< 0,001$ )  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

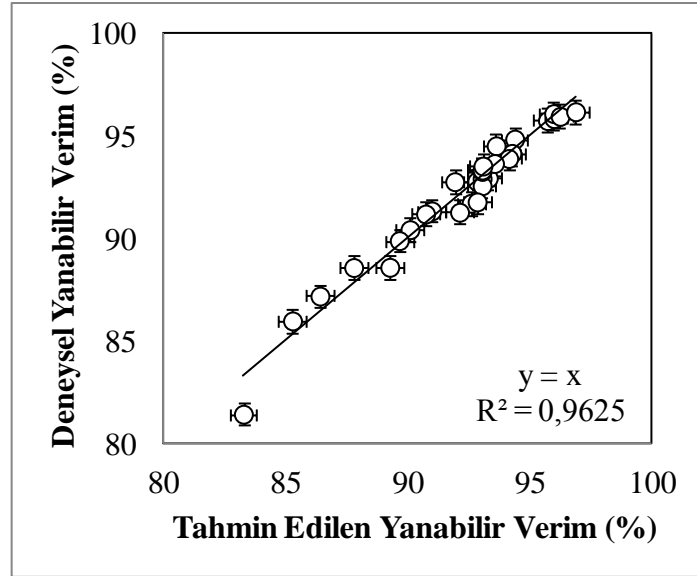
Çizelge 4.19'dan,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak yanabilir verim üzerinde etkin olan parametrelerin, PKO, Kİ, BH ve  $PKO^2$  kodlu değerleri ile verilen PKO, kül içeriği ve besleme hızı olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin PKO ve kül içeriği olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra besleme hızı ve tane boyutu gelmektedir. G değerinin etkisi ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. PKO ve besleme hızı ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki, kül içeriği ile yanıt arasında ise negatif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, PKO ve besleme hızı arttıkça yanabilir verimin artacağı, kül içeriğinin artmasının ise yanabilir verimi düşüreceğidir. PKO'nun yanıt üzerine negatif kuadratik etkisi vardır. Bu etki PKO'nun artışının yanabilir verimi artacağı, artış devam ederse düşüreceğinin göstergesidir.

Yanabilir verim modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.20'de verilmiştir. Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen yanabilir verim modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.25'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere yanabilir verim için  $R^2$  değeri 0,9625 olarak belirlenmiştir. Yanabilir verim model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kül içeren kömürü zenginleştirme işleminin % 96,25'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,89, korelasyon katsayısı 0,981, standart sapma ise 1,04 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.



**Çizelge 4.20 :** Yanabilir verim için deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney No	Yanabilir Verim (%)			Deney No	Yanabilir Verim (%)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	85,97	85,27	0,70	17	89,90	89,65	0,24
2	94,86	94,39	0,48	18	91,20	90,73	0,47
3	94,17	94,27	-0,11	19	95,98	96,25	-0,27
4	95,77	95,73	0,04	20	92,93	93,05	-0,12
5	95,87	95,99	-0,13	21	91,28	92,12	-0,84
6	94,54	93,62	0,91	22	87,18	86,40	0,79
7	93,23	93,05	0,18	23	93,92	94,14	-0,22
8	88,59	89,26	-0,67	24	92,58	93,05	-0,47
9	91,35	90,99	0,36	25	93,28	93,05	0,23
10	91,73	92,60	-0,87	26	93,35	93,05	0,30
11	96,11	95,98	0,13	27	81,40	83,26	-1,85
12	93,32	93,05	0,27	28	91,79	92,84	-1,05
13	92,80	92,83	-0,03	29	96,20	96,88	-0,68
14	88,58	87,78	0,80	30	93,67	93,56	0,11
15	92,95	93,30	-0,35	31	92,78	91,93	0,85
16	90,43	90,09	0,34	32	93,54	93,08	0,46



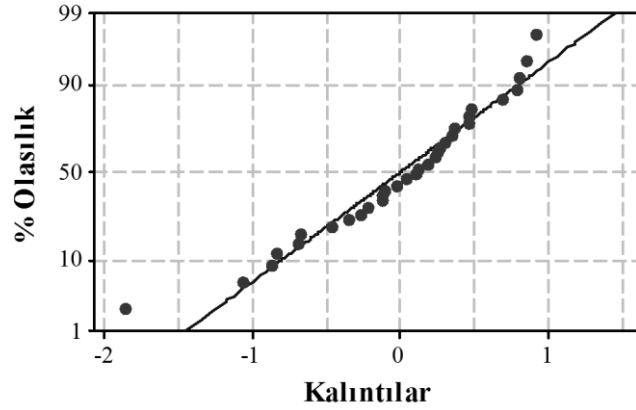
**Şekil 4.25 :** Yanabilir verim için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

#### Model uygunluk testleri

Katsayılarından sonra yanabilir verim modelinin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılar da test edilmiştir.

### Normalite varsayımı

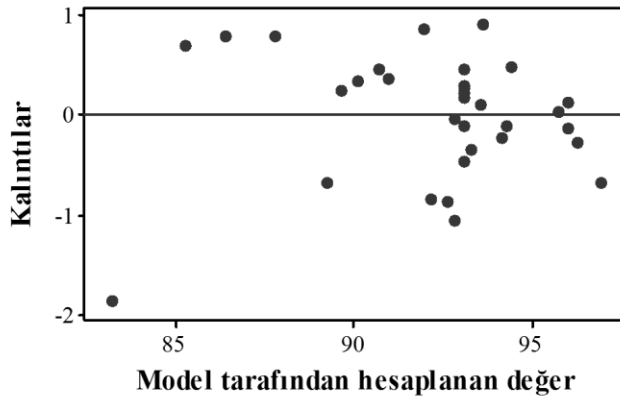
Şekil 4.26'de kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.



Şekil 4.26 : Yanabilir verim için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

Şekil 4.27'de hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.

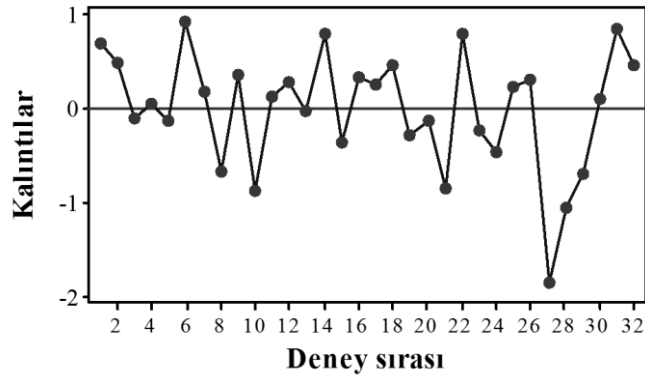


Şekil 4.27 : Yanabilir verim için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

Şekil 4.28'de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele

dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir



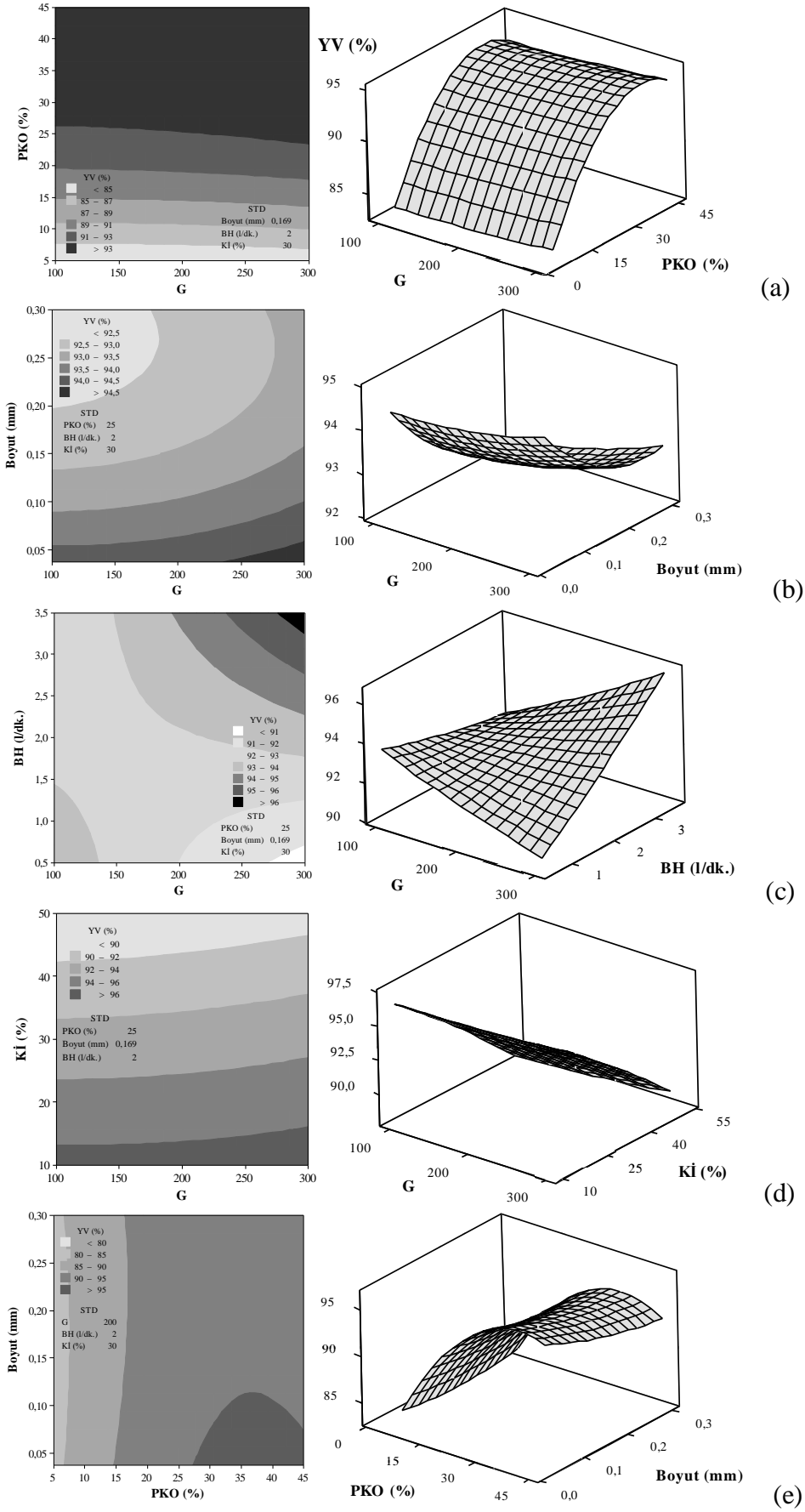
Şekil 4.28 : Yanabilir verim için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

### Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri

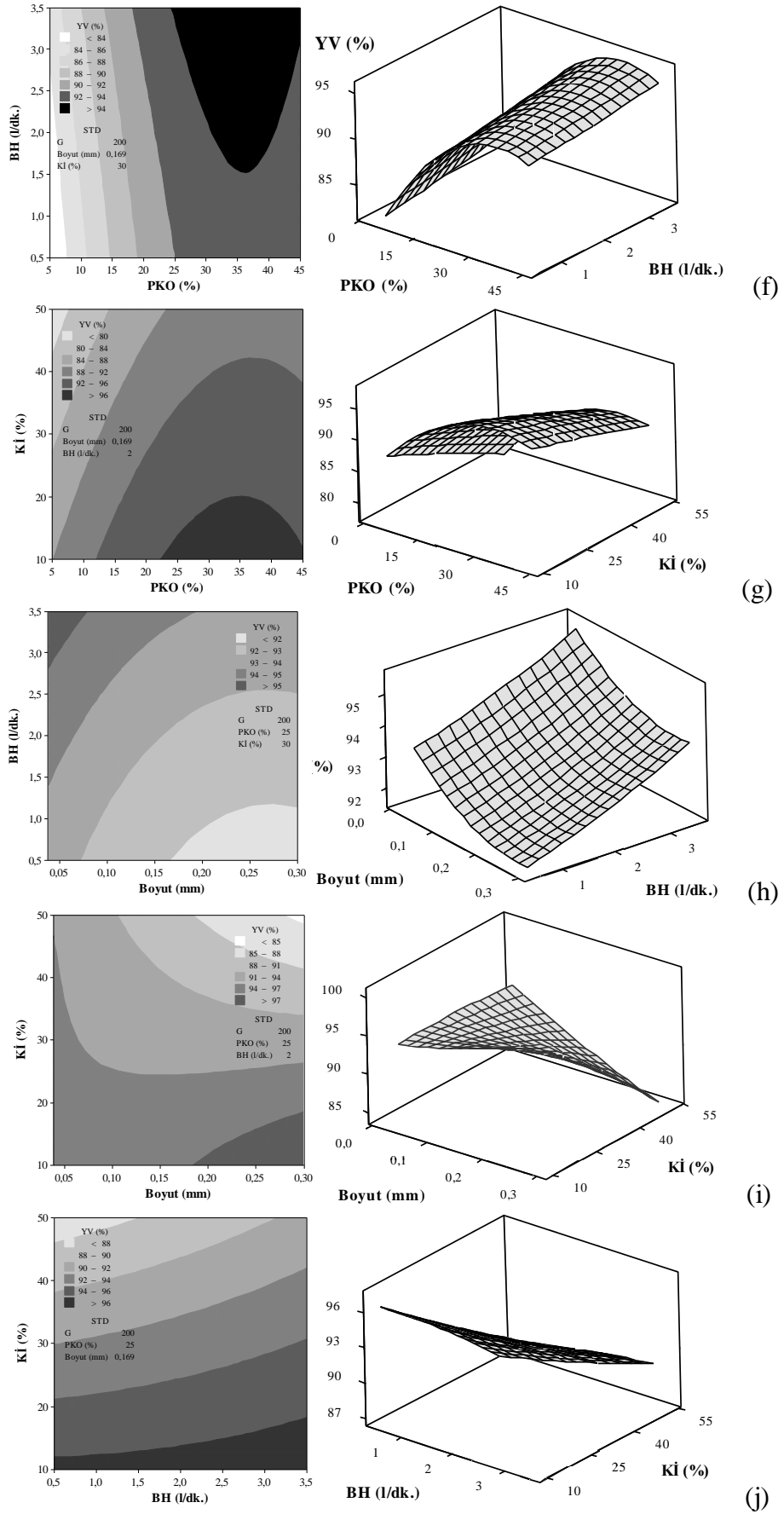
Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.7’de verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve yanabilir verim üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.29’da verilmiştir.

Şekil 4.29 (a)’da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30), G ve PKO’nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO’nun yanabilir verime etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve yanabilir verimdeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak PKO’ya göre değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de en yüksek yanabilir verim değerlerinin % 25’ten yüksek PKO değerlerinde elde edilebileceği görülmektedir.

G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.29 (b)’de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin dairesel yapısı noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ifade eder. G ve tane boyutu arasındaki ilişki ihmal edilebilir. Kontur grafiğinden, en yüksek yanabilir verim değerleri 150 mikron altındaki malzemelerde elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.29 : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



Şekil 4.29 : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri (devam).

Şekil 4.29 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin yanabilir verimi etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak yanabilir verimde artma ya da azalma görülmektedir. Yüksek besleme hızlarında yanabilir verimin arttığı görülmektedir. En yüksek yanabilir verime G değerinin ve besleme hızının yüksek olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kontur grafiği de, %95'dan büyük bir yanabilir verimin 200 G'de 3,0 litre/dakikadan hızlı beslemelerde elde edilebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.29 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve yanabilir verimdeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak kül içeriğinin değişimi ile değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de en yüksek yanabilir verim değerlerine % 25'ten az kül içeriğinde ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 4.29 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden yanabilir verime olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin yanabilir verimi etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak yanabilir verimde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte baskın olan parametre PKO olarak görülmektedir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, en yüksek yanabilir verim (% 95) PKO'nun %28'den büyük olduğu durumlarda 0,106 mm tane boyutu için elde edilebilir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kül içeriğinde (% 30), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının yanabilir verime etkileri görülmektedir (Şekil 4.29 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını, sistemin besleme hızından bağımsız PKO'nun değişimine bağlı olduğunu göstermektedir. En iyi yanabilir verim sonuçları yüksek PKO'larda elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de

görüldüğü üzere, % 94'ten büyük yanabilir verimler % 25 PKO'dan ve 1,5 litre/dakika besleme hızından yüksek çalışma koşullarında elde edilebilir.

PKO ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.29 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde yanabilir verimin PKO değişiminden daha fazla etkilendiği görülür. PKO değerinin artışı önce yanabilir verimi artırmakta, belirli bir seviyede maksimum olduktan sonra PKO'nun devam eden artışı yanabilir verimin düşmesine sebep olmaktadır. Kontur grafiğinden ise yüksek yanabilir verim değerlerinin %25'ten yüksek PKO'larda, % 20'den az kül içeriklerinde elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.29 (h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. tane boyutunun azalışı ve besleme hızının artışı yanabilir verimi olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinde, en yüksek yanabilir verimin 150 mikrondan küçük tane boyutlarında 1,5 litre/dakikadan hızlı besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika), tane boyutu ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğriler Şekil 4.29 (i)'de görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve tane boyutu ve kül içeriğinin arasındaki iç etkileşimin yanabilir verimi etkilediğini göstermektedir. En yüksek yanabilir verimlerin 212-300 mikron arasında % 20'den düşük kül miktarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.29 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiği durağan sırt yapısındadır ve yanabilir verim kül içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Kontur grafiğinden, %95'ten büyük yanabilir verimlerin %20'den az kül içerikleri için elde edilebileceği görülmektedir.

#### **4.2.1.3 Temiz kömür verimi için model denklemi**

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan temiz kömür verimini ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.6).

$$\begin{aligned}
Y_{TKV}= & 84,7990+0,2613X_1+2,9510X_2-0,7245X_3+0,9148X_4-4,8845X_5- \\
& 0,0512X_1^2-1,1549X_2^2+0,5910X_3^2-0,0630X_4^2+0,2770X_5^2-0,0296X_1X_2 \\
& +0,0702X_1X_3+0,3387X_1X_4+0,1492X_1X_5-0,0671X_2X_3- \\
& 0,2224X_2X_4+0,8482X_2X_5-0,0704X_3X_4-1,0961X_3X_5+0,4728X_4X_5
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.6) model katsayılarına göre incelendiğinde, temiz kömür verimini en fazla etkileyen bağımsız değişkenin kül içeriği olduğu görülmektedir. Bunu sırası ile PKO, besleme hızı ve tane boyutu takip etmektedir. G değerinin ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Temiz kömür verimi modeli için, kül içeriği ve tane boyutu sistemi negatif etkilerken PKO, besleme hızı ve G değerinin sistemi pozitif etkilediği görülmektedir. Kül içeriği ve tane boyutunun artması temiz kömür veriminin düşmesine sebep olur. PKO, besleme hızı ve G değerinin artışları ise temiz kömür verimini artırmaktadır. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

#### **Varyans Analizi (ANOVA)**

Temiz kömür verimi modelinin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek için yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Temiz kömür verimi modelinin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.21’den görüldüğü gibi, model F değeri 23,07 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2’den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{hesaplanan} > F_{çizelge}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

#### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05’ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Temiz kömür verimi modeli için elde edilmiş olan P değeri ( $< 0,001$ )  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.21’den,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak temiz kömür verimi üzerinde etkin olan parametrelerin Kİ, PKO, BH, B ve PKO<sup>2</sup> kodlu değerleri ile verilen kül içeriği PKO, besleme hızı ve tane boyutu olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların



incelenmesi ile en etkin parametrenin kül içeriği ve PKO olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra besleme hızı ve tane boyutu gelmektedir. G değerinin etkisi ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. PKO ve besleme hızı ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki, kül içeriği ve tane boyutu ile yanıt arasında ise negatif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, temiz kömür veriminin PKO ve besleme hızı arttıkça artacağı, kül içeriğinin artması ile düşeceği, PKO'nun yanıt üzerine negatif kuadratik etkisi vardır. Bu etki PKO'nun artışının temiz kömür verimini artıacağı, artışın sürmesi halinde ise düşüreceğinin göstergesidir.

**Çizelge 4.21** : Temiz kömür verimi modeli için varyans analizi (ANOVA).

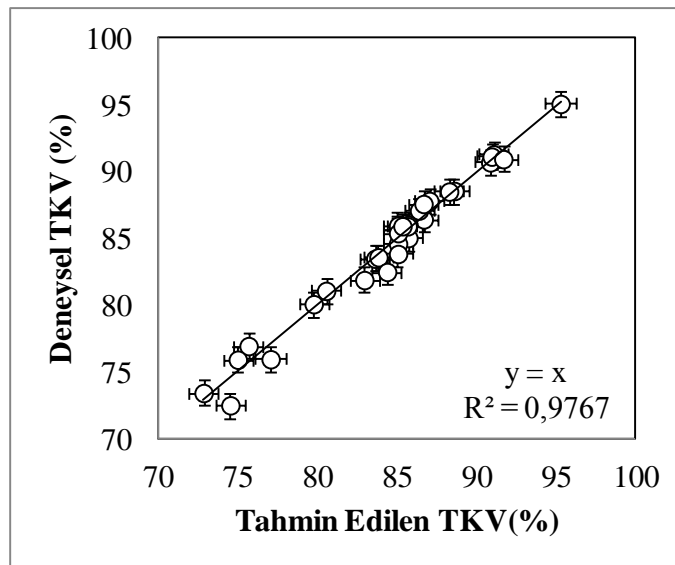
Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	<b>854,917</b>	<b>42,746</b>	<b>23,07</b>	<b>0,000</b>
G	1	1,469	1,504	0,81	0,387
PKO	1	210,889	191,851	103,55	0,000
B	1	10,980	9,794	5,29	0,042
BH	1	20,702	18,436	9,95	0,009
Kİ	1	522,733	525,620	283,69	0,000
G <sup>2</sup>	1	0,098	0,076	0,04	0,844
PKO <sup>2</sup>	1	46,214	38,467	20,76	0,001
B <sup>2</sup>	1	8,435	9,012	4,86	0,050
BH <sup>2</sup>	1	0,238	0,114	0,06	0,808
Kİ <sup>2</sup>	1	2,213	2,213	1,19	0,298
G*PKO	1	0,014	0,014	0,01	0,932
G*B	1	0,052	0,052	0,03	0,870
G*BH	1	1,836	1,836	0,99	0,341
G*Kİ	1	0,356	0,356	0,19	0,670
PKO*B	1	0,048	0,048	0,03	0,876
PKO*BH	1	0,792	0,792	0,43	0,527
PKO*Kİ	1	11,511	11,511	6,21	0,030
B*BH	1	0,052	0,052	0,03	0,870
B*Kİ	1	12,708	12,708	6,86	0,024
BH *Kİ	1	3,577	3,577	1,93	0,192
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>20,381</b>	<b>1,853</b>		
Uyum eksikliği	6	17,125	2,854	4,38	0,063
Saf hata	5	3,256	0,651		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>875,298</b>			

Temiz kömür verimi modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.22'de verilmiştir. Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen temiz kömür verimi modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.30 grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de

görüreceği üzere temiz kömür verimi için  $R^2$  değeri 0,9767 olarak belirlenmiştir. Temiz kömür verimi model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kül içeren kömür zenginleştirilme işleminin % 97,67'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,9344, korelasyon katsayısı 0,988, standart sapma ise 1,36 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.22 :** Temiz kömür verimi için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney No	Temiz Kömür Verimi (%)			Deney No	Temiz Kömür Verimi (%)		
	DeneySEL	Tahmin	Hata		DeneySEL	Tahmin	Hata
1	73,40	72,81	0,59	17	80,07	79,75	0,32
2	88,56	88,61	-0,05	18	87,81	87,03	0,78
3	86,43	86,68	-0,25	19	95,09	95,30	-0,21
4	90,70	90,87	-0,16	20	85,95	85,06	0,89
5	91,30	91,08	0,22	21	81,88	82,94	-1,06
6	87,09	86,38	0,71	22	75,90	74,97	0,93
7	85,71	85,06	0,66	23	85,91	85,66	0,24
8	75,93	77,03	-1,10	24	84,60	85,06	-0,46
9	81,07	80,53	0,54	25	85,40	85,06	0,34
10	85,03	85,71	-0,68	26	83,83	85,06	-1,23
11	91,14	90,95	0,18	27	72,48	74,50	-2,02
12	85,59	85,06	0,54	28	82,48	84,37	-1,89
13	83,48	83,62	-0,14	29	90,95	91,69	-0,74
14	76,92	75,65	1,28	30	85,91	85,34	0,58
15	83,58	83,83	-0,24	31	87,58	86,66	0,92
16	86,01	85,72	0,30	32	88,51	88,28	0,24



**Şekil 4.30 :** Temiz kömür verimi için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

### Model uygunluk testleri

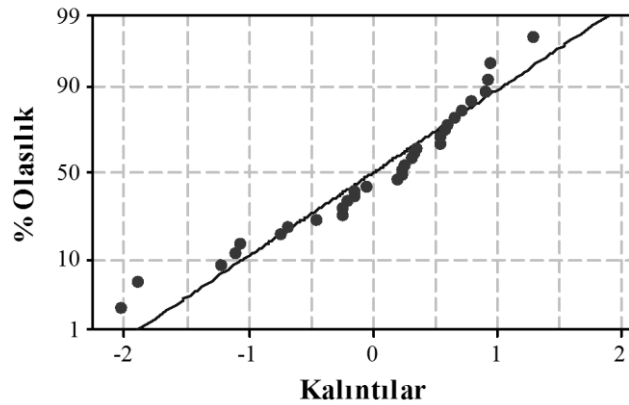
Katsayılarından sonra temiz kömür verimi modelinin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılarda test edilmiştir.

### Normalite varsayımı

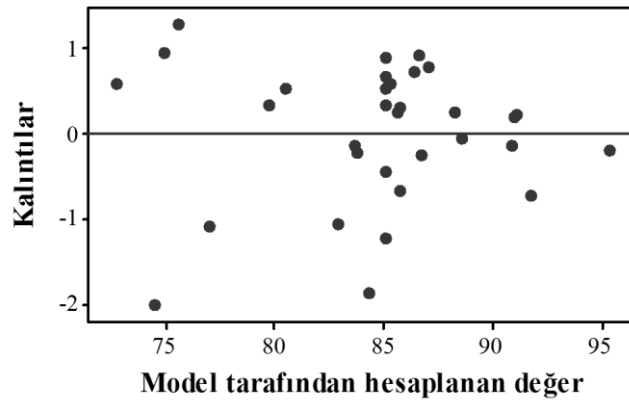
Şekil 4.31'de kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

Şekil 4.32'de hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



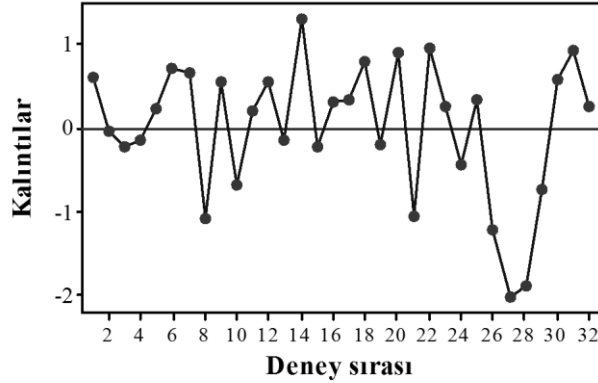
Şekil 4.31 : Temiz kömür verimi için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.



Şekil 4.32 : Temiz kömür verimi için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

Şekil 4.33'te deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir

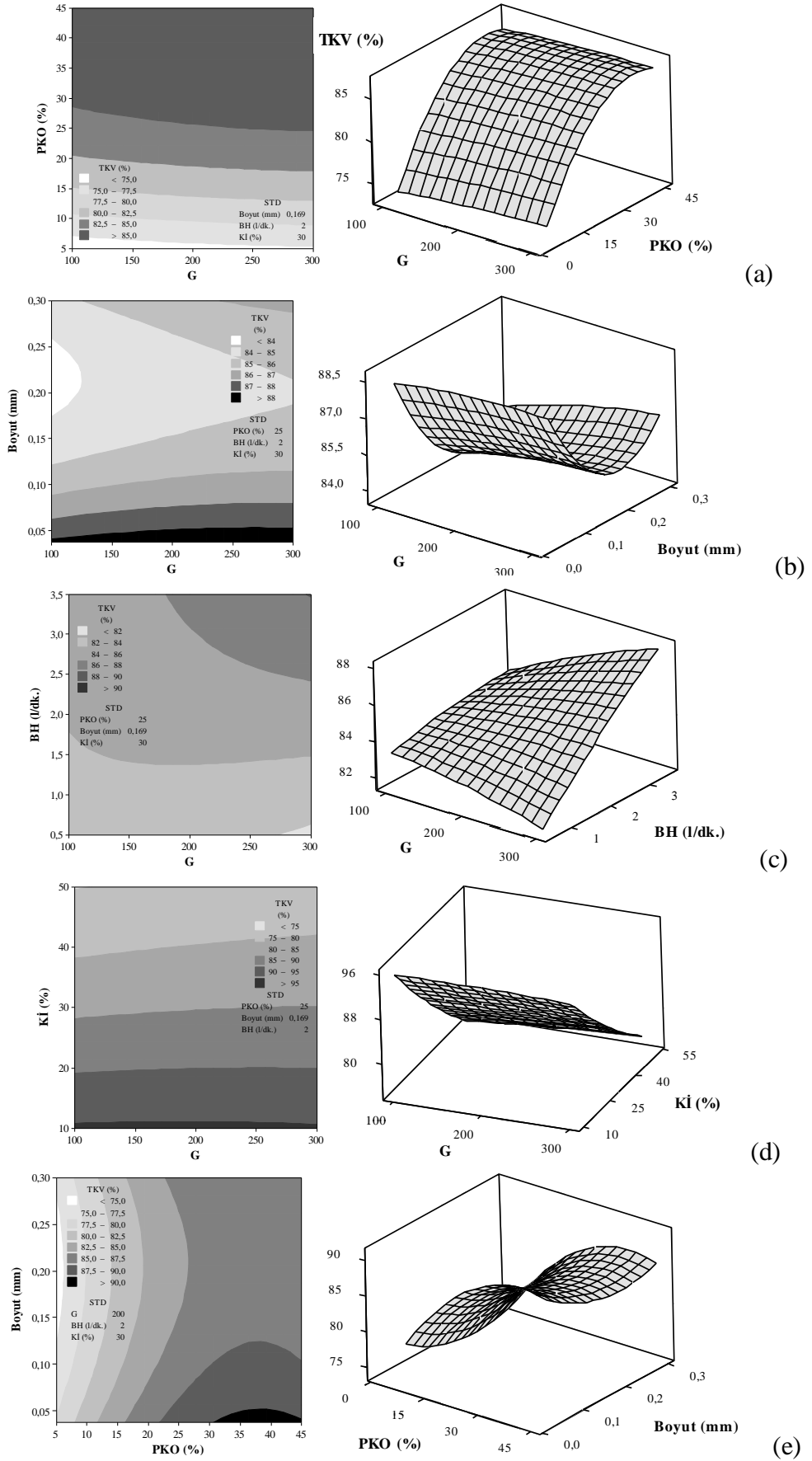


Şekil 4.33 : Temiz kömür verimi için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

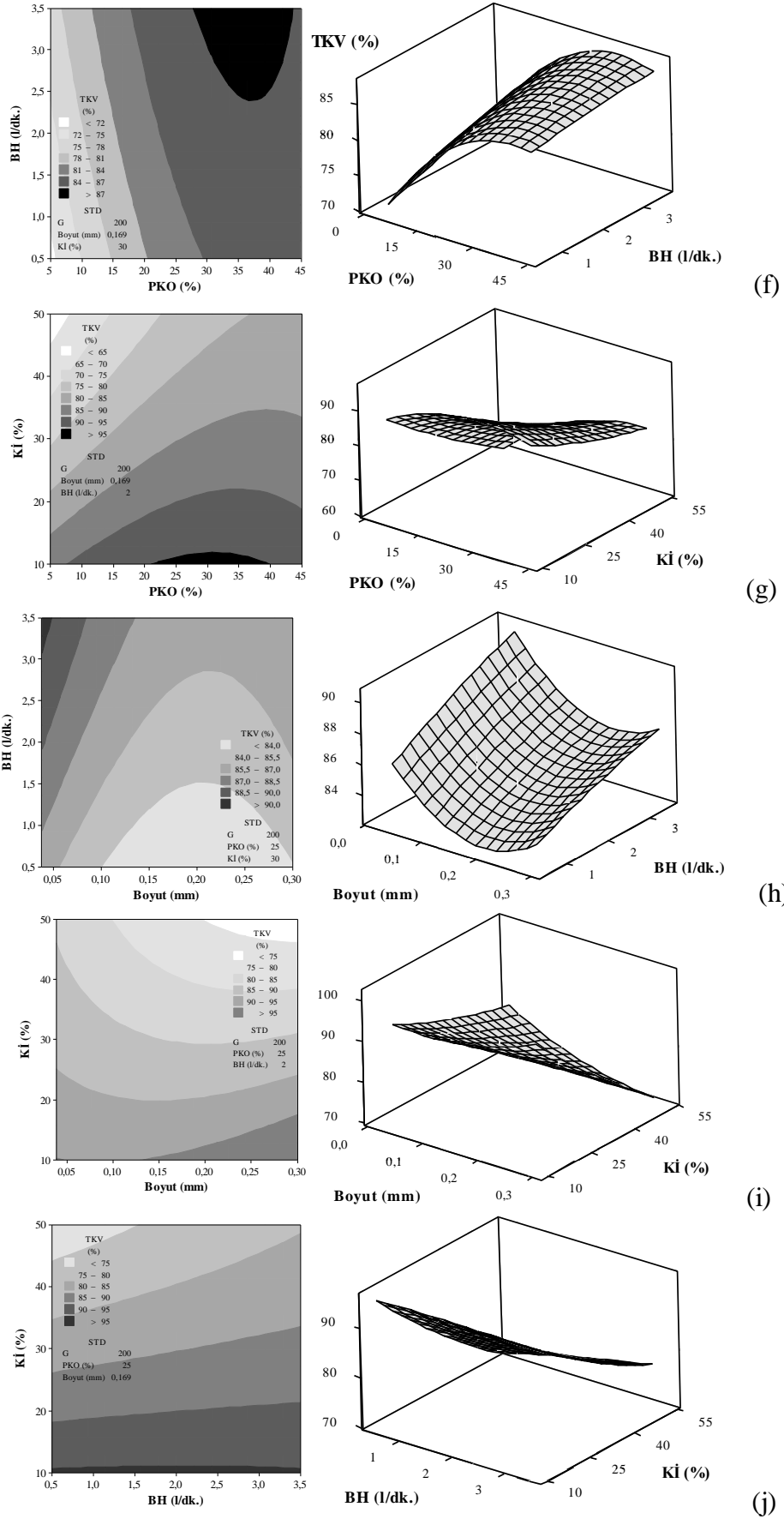
### Bağımsız Değişkenlerin Zenginleştirmeye Etkileri

Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.7'de verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve temiz kömür verimi üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.34'te verilmiştir.

Şekil 4.34(a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO'nun temiz kömür verimine etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve temiz kömür verimindeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak PKO'ya göre değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de % 85 üzerindeki temiz kömür veriminin % 30'dan fazla PKO'larda elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 4.34 : Temiz kömür verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



Şekil 4.34: Temiz kömür verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri (devam)

G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.34 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin temiz kömür verimini etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak temiz kömür veriminde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte baskın olan parametre besleme boyutu olarak görülmektedir. Kontur grafiği de, görüldüğü üzere, en yüksek temiz kömür verimi (% 88), -0,038 mm besleme boyutu için elde edilebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.34 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, besleme boyutu -0,150 mm ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde sistemin G'den bağımsız besleme hızına bağlı olduğu görülmektedir. En yüksek temiz kömür verimi G değerinin ve besleme hızının yüksek olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kontur grafiğinde, en yüksek temiz kömür verimlerinin 200'den büyük G değerlerinde ve 2,5 litre/dakikadan hızlı besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.34 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve temiz kömür verimindeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak kül içeriğine bağlı olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden, en yüksek temiz kömür verimlerine (%90) % 20'den az kül içeriğinde ulaşıldığı görülmektedir.

Şekil 4.34 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden temiz kömür verimine olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin temiz kömür verimini etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte baskın olan parametre PKO olarak görülmektedir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, en temiz kömür verimi (% 90) 38 mikron tane boyutunda % 30'dan büyük

PKO'larda, % 88 civarı temiz kömür verimi ise 106 mikronda % 23'ten büyük PKO'larda elde edilebilir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kül içeriğinde (% 30), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının temiz kömür verimine etkileri görülmektedir (Şekil 4.34 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını, sistemin besleme hızından çok, PKO'nun değişimine bağlı olduğunu göstermektedir. En yüksek temiz kömür verimleri, yüksek PKO'larda elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, % 87'den büyük temiz kömür verimleri % 30-45 PKO aralığında ve 2,5 litre/dakikadan hızlı besleme hızlarında elde edilebilir.

PKO ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.34 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yüksek kül içeriklerinde, PKO ve kül içeriğinin sistem üzerine lineer bir etkisi vardır, artış ve azalışları temiz kömür veriminde artış ve azalışa sebep olur. Kontur grafiğinden ise yüksek temiz kömür verimlerinin %20'den yüksek PKO'larda % 15'den az kül içeriklerinde elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.34(h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Tane boyutunun azalışı ve besleme hızının artışı temiz kömür verimini olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinde, yüksek temiz kömür verimlerinin (>88) 100 mikrondan küçük tane boyutlarında 3 litre/dakikadan hızlı beslemelerde elde edilebileceği görülmektedir

Sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika) tane boyutu ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğriler Şekil 4.34 (i)'de görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin azalan sırt yapısı durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ifade etmektedir. Sistem tane boyutundan ziyade kül içeriğinin etkisindedir. Kül miktarının azalması ile temiz kömür verimi artmakta, en iyi verim 150 mikron ve üzeri tane boyutlarında % 15'ten az kül içeriklerinde elde edilmiştir.

Şekil 4.34 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt



yüzeyi grafiği durağan sırt yapısındadır ve temiz kömür verimi kül içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Kontur grafiği, %95'ten büyük temiz kömür verimlerinin %20'den az kül içeriklerinde elde edilebileceği göstermektedir.

#### 4.2.1.4 Kül uzaklaştırma oranı için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan kül uzaklaştırma oranını ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.7).

$$\begin{aligned} Y_{KUO} = & 31,9107 - 0,1556X_1 - 3,6458X_2 + 1,7561X_3 - 1,6537X_4 + 4,0824X_5 + \\ & 0,3589X_1^2 + 1,8439X_2^2 - 0,9442X_3^2 + 0,6864X_4^2 - 1,2648X_5^2 - 0,0100X_1X_2 - \\ & 0,4033X_1X_3 + 0,2454X_1X_4 - 0,6356X_1X_5 - 0,2027X_2X_3 + 0,6348X_2X_4 - \\ & 2,2550X_2X_5 + 0,3502X_3X_4 + 0,5566X_3X_5 - 0,8541X_4X_5 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.7) model katsayılarına göre incelendiğinde, kül uzaklaştırma oranını en fazla etkileyen bağımsız değişkenin kül içeriği olduğu görülmektedir. Bunu sırası ile PKO, tane boyutu ve besleme hızı takip etmektedir. G değerinin ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Kül uzaklaştırma oranı modeli için, PKO, besleme hızı ve G değeri sistemi negatif etkilerken kül içeriği ve tane boyutunun etkisi pozitif yönde olmaktadır. PKO, besleme hızı ve G değerinin artması kül uzaklaştırma oranının azalmasına sebep olur. kül içeriği ve tane boyutunun artışları ise kül uzaklaştırma oranını artırmaktadır. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

#### Varyans Analizi (ANOVA)

Kül uzaklaştırma oranı için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.23'te verilmiştir.

Kül uzaklaştırma oranı modelinin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.23'ten görüldüğü gibi, model F değeri 5,10 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2'den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{hesaplanan} > F_{çizelge}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

**Çizelge 4.23 : Kül uzaklaştırma oranı modeli için varyans analizi (ANOVA).**

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	1147,26	57,363	5,10	0,004
G	1	0,14	0,534	0,05	0,832
PKO	1	312,01	292,835	26,04	0,000
B	1	62,15	57,540	5,12	0,045
BH	1	71,26	60,246	5,36	0,041
Kİ	1	378,63	367,162	32,65	0,000
G <sup>2</sup>	1	4,43	3,715	0,33	0,577
PKO <sup>2</sup>	1	119,81	98,047	8,72	0,013
B <sup>2</sup>	1	19,87	22,998	2,04	0,181
BH <sup>2</sup>	1	19,17	13,587	1,21	0,295
Kİ <sup>2</sup>	1	46,14	46,135	4,10	0,068
G*PKO	1	0,00	0,002	0,00	0,991
G*B	1	1,72	1,721	0,15	0,703
G*BH	1	0,96	0,964	0,09	0,775
G*Kİ	1	6,46	6,465	0,57	0,464
PKO*B	1	0,43	0,434	0,04	0,848
PKO*BH	1	6,45	6,447	0,57	0,465
PKO*Kİ	1	81,36	81,362	7,23	0,021
B*BH	1	1,30	1,297	0,12	0,741
B*Kİ	1	3,28	3,277	0,29	0,600
BH *Kİ	1	11,67	11,672	1,04	0,330
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	123,72	11,247		
Uyum eksikliği	6	115,42	19,237	11,59	0,008
Saf hata	5	8,30	1,660		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	1270,98			

#### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P<0,05$ ) olmalıdır. Kül uzaklaştırma oranı modeli için elde edilmiş olan P değeri (0,004)  $P<0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.23'ten  $P<0,05$  koşulunu sağlayarak kül uzaklaştırma oranı üzerinde etkin olan parametrenin Kİ, PKO, B, BH, PKO<sup>2</sup> ve PKO\*Kİ kodlu değerleri ile verilen kül içeriği, PKO, tane boyutu ve besleme hızı olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin kül içeriği ve PKO olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra tane boyutu ve hızı gelmektedir. G değerinin etkisi ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. Kül içeriği ve tane boyutu ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki varken, PKO ve besleme hızı ile negatif doğrusal etki görülmektedir.

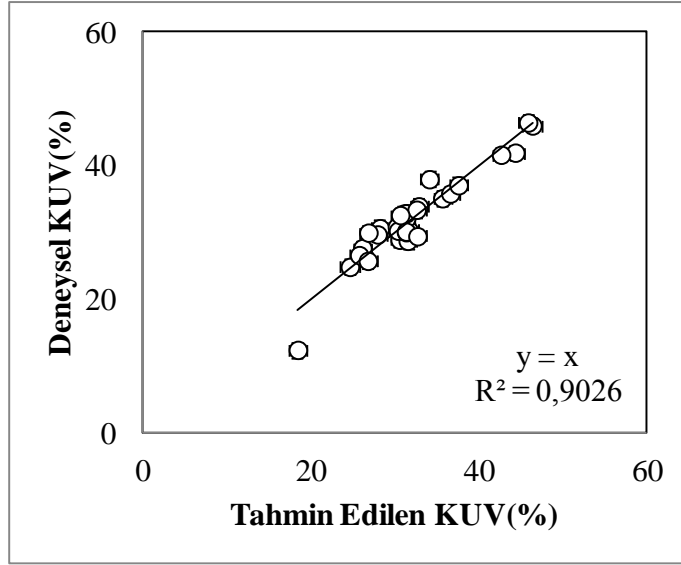
Bunun anlamı, kül içeriği ve tane boyutu arttıkça kül uzaklaştırma oranının artacağı, PKO ve besleme hızının artmasının ise kül uzaklaştırma oranını düşüreceğidir.

PKO'nun yanıt üzerine pozitif kuadratik etkisi de vardır. Bu etki, PKO'nun artışının, kül uzaklaştırma oranını düşüreceği ancak artışın sürmesiyle verimin artacağı şeklindedir. Aynı zamanda PKO ve kül içeriği arasında negatif etkileşim vardır. Bu etki, kül içeriğinin azalışı ve PKO'nun artışı sonucu kül uzaklaştırma oranının minimum değere ulaşacağını belirtir.

Kül uzaklaştırma oranı modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.24'te verilmiştir. Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme deneyleri sonucunda üretilen kül uzaklaştırma oranı modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.35'te grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere kül uzaklaştırma oranı için  $R^2$  değeri 0,9027 olarak belirlenmiştir. Kül uzaklaştırma oranı model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilme işleminin % 90,27'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,7557, korelasyon katsayısı 0,950, standart sapma ise 3,35 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin normalize edilmiş ayırma verimi açısından kabul edilebilir bir ilişki olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.24 :** Kül uzaklaştırma oranı için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney No	Kül Uzaklaştırma Oranı (%)			Deney No	Kül Uzaklaştırma Oranı (%)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	46,04	46,3838	-0,34	17	35,83	36,5982	-0,77
2	24,82	24,6219	0,19	18	26,59	25,7269	0,86
3	28,89	30,557	-1,67	19	12,37	18,4207	-6,05
4	30,63	28,204	2,43	20	30,03	31,3218	-1,29
5	27,64	26,1187	1,52	21	37,07	37,578	-0,51
6	28,73	31,5232	-2,79	22	41,65	42,6506	-1,00
7	31,11	31,3218	-0,21	23	25,73	26,7716	-1,04
8	37,98	34,1044	3,87	24	32,10	31,3218	0,78
9	35,12	35,6494	-0,53	25	30,11	31,3218	-1,21
10	30,30	31,6461	-1,34	26	32,86	31,3218	1,54
11	29,69	27,9238	1,77	27	46,49	45,8714	0,62
12	32,86	31,3218	1,54	28	33,91	32,8347	1,08
13	30,84	30,2312	0,61	29	29,96	26,8315	3,13
14	41,96	44,3437	-2,38	30	29,42	32,6802	-3,26
15	30,25	30,3648	-0,12	31	33,40	32,5817	0,82
16	32,81	31,025	1,79	32	32,59	30,6232	1,96

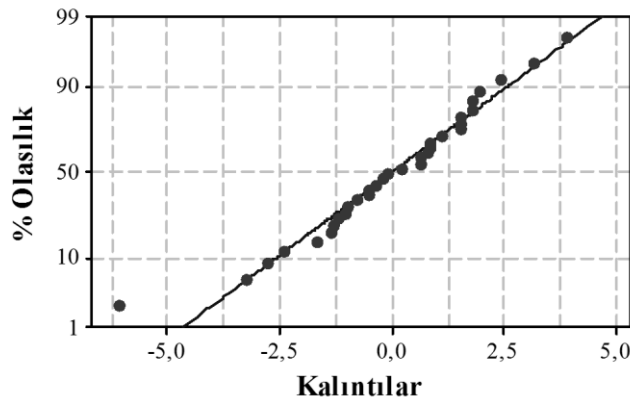


**Şekil 4.35 :** Kül uzaklaştırma oranı için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

### Model uygunluk testleri

#### Normalite varsayımı

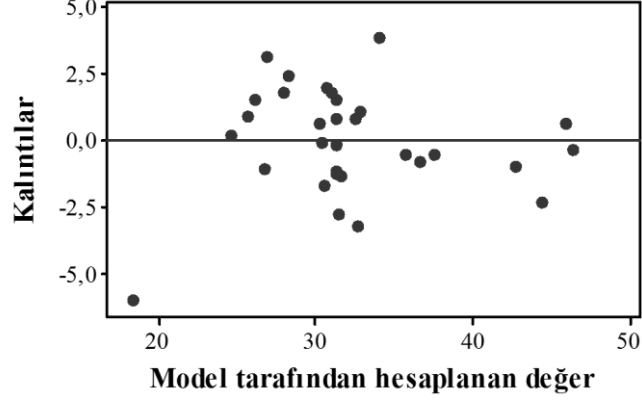
Şekil 4.36’da kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.



**Şekil 4.36 :** Kül uzaklaştırma oranı için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.

#### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

Şekil 4.37’de hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



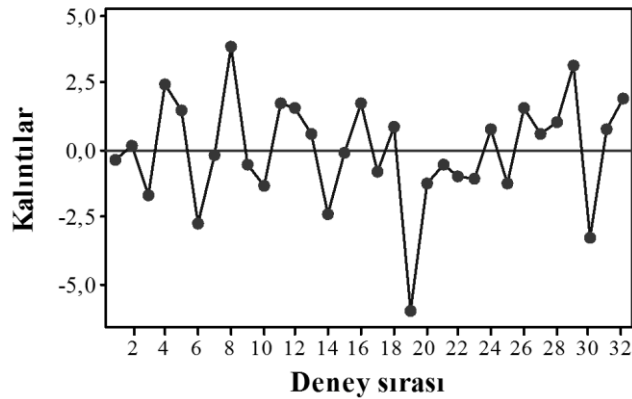
**Şekil 4.37 :** Kül uzaklaştırma oranı için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### **Zaman Sıralamasında Kalıntıların işaretlenmesi**

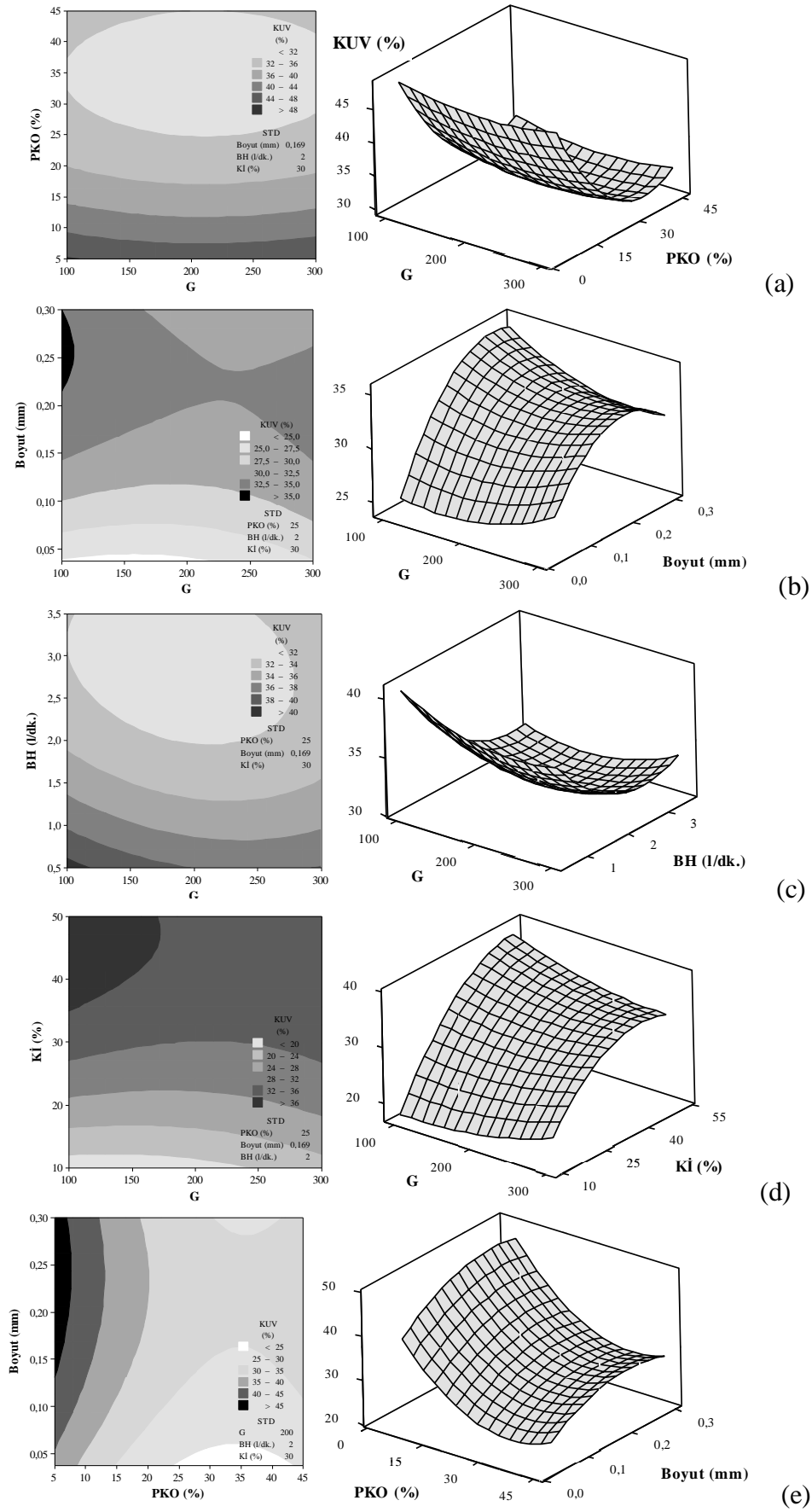
Şekil 4.38’de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir

### **Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri**

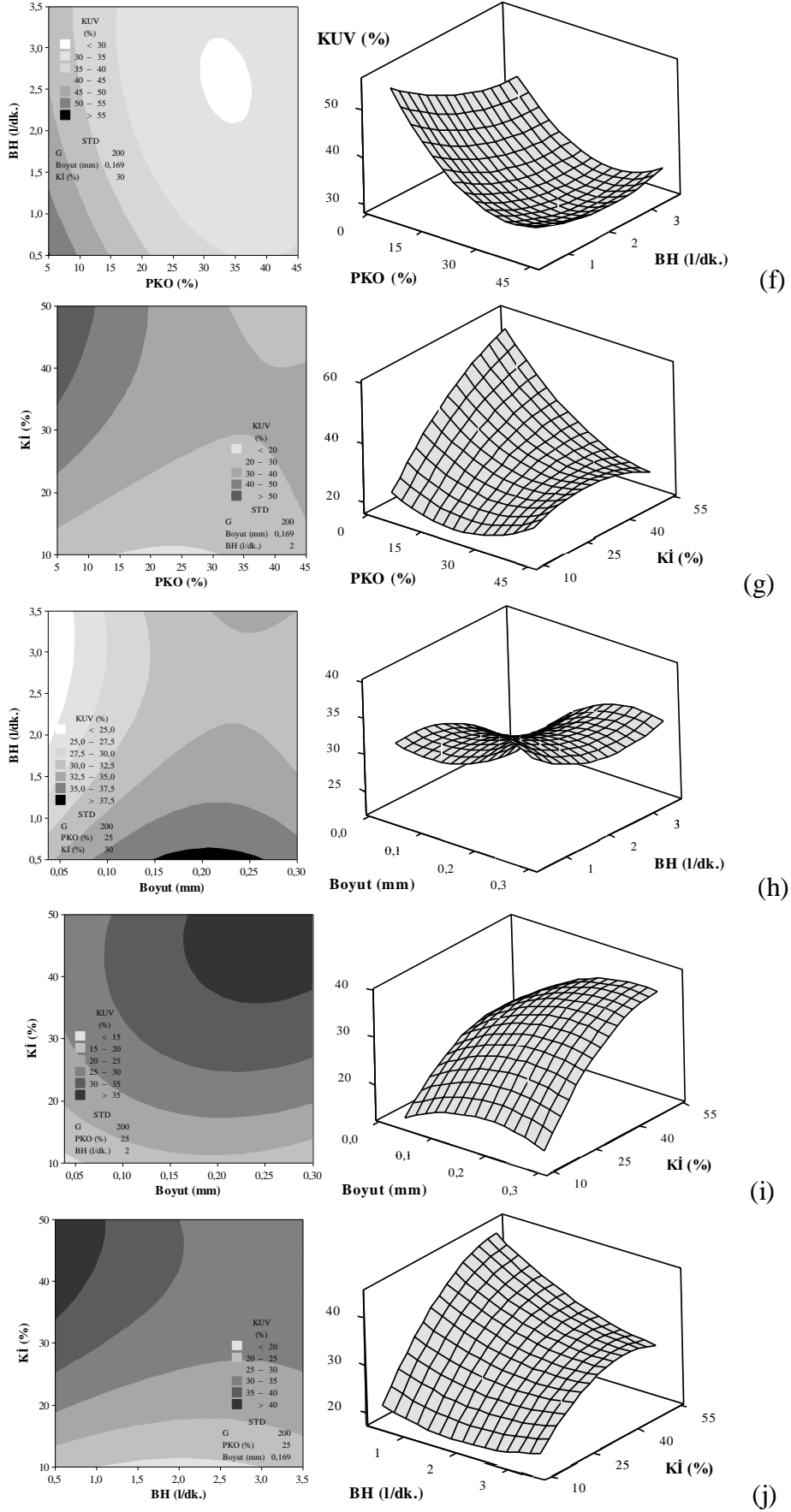
Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.7’de verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve kül uzaklaştırma oranı üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.39’da verilmiştir.



**Şekil 4.38 :** Kül uzaklaştırma oranı için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.



Şekil 4.39 : Kül uzaklaştırma oranı için yanı yüzey ve kontur grafikleri.



Şekil 4.39 : Kül uzaklaştırma oranı için yanı yüzey ve kontur grafikleri (devam).

Şekil 4.39 (a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve PKO arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranı için önemli olduğunu göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça verim artmaktadır. Kontur grafiğinden de, düşük PKO değerlerinde sistemin G'den bağımsız olarak PKO'ya göre davrandığı, en yüksek kül uzaklaştırma oranının PKO % 10'un altında elde edilebileceği görülmektedir.

G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.39 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme boyutu arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediği göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kül uzaklaştırma oranında artma ya da azalma görülmektedir. Büyük tane boyutlarında kül uzaklaştırma oranının arttığı görülmektedir. En yüksek kül uzaklaştırma oranı G değerinin düşük ve tane boyutunun en büyük olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kontur grafiği de, %35'ten büyük kül uzaklaştırma oranının 100 G'de 212 mikrondan büyük tane boyutlarında elde edilebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.39 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranı için önemli olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden de görülebileceği gibi, % 40'tan fazla kül uzaklaştırma verimleri 100 G altında ve 0,5 litre/dakika besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.39 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve kül içeriği arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. En iyi kül uzaklaştırma oranı 175 G altında %35'ten fazla kül içeriğinde elde edilebileceği kontur grafiğinden de görülmektedir.



Sabit G değeri (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kül içeriğinde (% 30), PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve tane boyutunun kül uzaklaştırma oranına etkileri görülmektedir (Şekil 4.39 (e)). Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kül uzaklaştırma oranında artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Düşük PKO değerlerinde sistem tane boyutundan bağımsız PKO'ya göre davranmaktadır. Kontur grafiğinden de, en yüksek uzaklaştırma verimlerinin %10'dan küçük PKO'lar için 150 mikrondan büyük tane boyutlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kül içeriğinde (% 30), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının kül uzaklaştırma oranına etkileri görülmektedir (Şekil 4.39 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranı için önemli olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden de görülebileceği gibi, % 45'in üzerindeki kül uzaklaştırma verimlerinin % 15'den düşük PKO ve 2 litre/dakikadan yavaş beslemelerde elde edilebileceği görülmektedir.

PKO ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.39 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve kül içeriğinin arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kül uzaklaştırma oranında artma ya da azalma olduğu görülmektedir. En iyi verimler yüksek kül ve düşük PKO'larda elde edilebilmektedir. Kontur grafiğinden de %50 üzerinde kül uzaklaştırma verimlerinin % 35'ten fazla kül içeriğinde % 10'dan düşük PKO'larda elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.39(h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kül içeriği % 30 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ifade etmektedir. tane boyutu ve besleme hızının arasındaki iç etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kül uzaklaştırma oranında artma ya da azalma olduğu

görülmektedir. Kontur grafiğinde, yüksek kül uzaklaştırma verimlerinin (>38) 150-250 mikron tane boyutlarında 0,5 litre/dakika besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir

Sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika) tane boyutu ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğriler Şekil 4.39 (i)'de görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin Yanıt yüzeyi grafiğinin dairesel yapısı kül içeriği ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.39 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kül içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiği eyer yapısındadır ve durağan noktanın deney bölgesi içinde olduğunu göstermektedir. Besleme hızı ve kül içeriği arasındaki etkileşimin kül uzaklaştırma oranını etkilediğini anlaşılmaktadır. En yüksek verim değerlerinin yüksek kül içeriklerinde düşük besleme hızlarında ulaşılabileceği görülmektedir. Kontur grafiklerinden de % 40 üzerinde bir kül uzaklaştırma oranının %35 ten büyük kül içerikleri ve 1 litre/dakikadan yavaş beslemelerde elde edilebileceği görülmektedir.

#### **4.2.1.5 Ayırma etkinliği yönünden inceleme**

Yapılan zenginleştirme işlemleri sonucunda elde edilen ürünler yanabilir verim, temiz kömür verimi ve kül uzaklaştırma verimleri yönünden analiz edilmiş ve modellenmiştir. Yapılan zenginleştirme işlemleri bir de ayırma etkinliğine göre incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre hesaplanan ayırma etkinliği değerleri Çizelge 4.25'te verilmiştir.

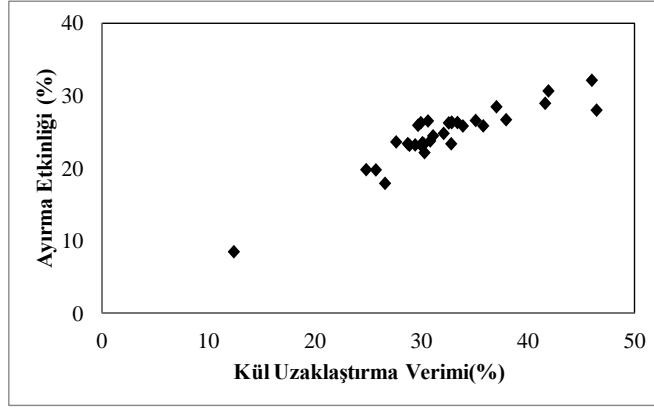
Çizelgeden ve Şekil 4.40'tan da görüldüğü gibi kül uzaklaştırma oranının artmasına bağlı olarak ayırma etkinliği de artmaktadır. Ayrılması istenilen külün uzaklaştırılması konsantre kalitesini artırmaktadır. Ancak, yanabilir verimin artışı ayırma etkinliğini düşürmektedir (Şekil 4.41). Yanabilir verimin artışı, elde edilen malzeme içerisinde yanabilen kısmın arttığını gösterdiği gibi yanabilen kısım ile birlikte gelen istenmeyen kül miktarında da arttığının göstergesidir. Bu sebepten dolayı zenginleştirme işlemleri değerlendirilirken, istenilen ve istenmeyen kısımları birbirinden ayırımındaki başarıyı ifade eden ayırma etkinliği de göz ardı edilmemelidir.

Elde edilen uzaklaştırma verimleri ve dolayısı ile ayırma verimlerinin düşüklüğü dikkat çekmektedir. Ancak bu değerlendirme deneylerde kullanılan kömürün

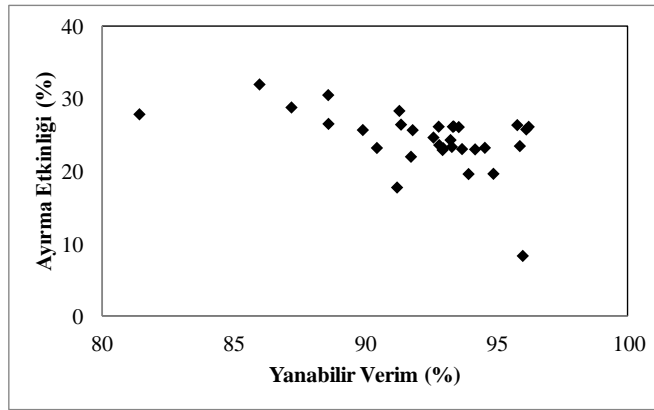
bünyesinde bulunan ve gravite yöntemleri ile ayrılma imkanı olmayan % 9,7'lik bünye külü de hesaplara katılarak yapılmıştır. Gerek kül uzaklaştırma oranı gerekse ayırma etkinliğinin, gravite yöntemleri ile ayrılabilceği varsayılan bünye külü miktarı üzerinden yapıldığı takdirde artması beklenmelidir.

**Çizelge 4.25 :** Yüksek küllü kömür zenginleştirme için ayırma etkinliği değerleri.

Tüvenan	Konsantre		Artık		Kül Uzaklaştırma Oranı (%)	Yanabilir Verim (%)	Ayırma Etkinliği (%)
	Kül (%)	Miktar (%)	Kül (%)	Miktar (%)			
39,26	73,4	28,86	26,6	67,96	46,04	85,97	32,01
32,03	88,6	27,19	11,4	69,47	24,82	94,86	19,68
33,57	86,4	27,62	13,6	71,44	28,89	94,17	23,05
19,18	90,7	14,67	9,3	63,21	30,63	95,77	26,40
19,41	91,3	15,38	8,7	61,69	27,64	95,87	23,50
32,01	87,1	26,19	12,9	71,23	28,73	94,54	23,27
30,88	85,7	24,82	14,3	67,24	31,11	93,23	24,34
47,64	75,9	38,91	24,1	75,17	37,98	88,59	26,57
38,86	81,1	31,10	18,9	72,06	35,12	91,35	26,47
30,40	85,0	24,92	15,0	61,53	30,30	91,73	22,03
19,27	91,1	14,87	8,9	64,57	29,69	96,11	25,80
29,51	85,6	23,15	14,4	67,31	32,86	93,32	26,18
39,44	83,5	32,67	16,5	73,61	30,84	92,80	23,64
38,17	76,9	28,80	23,1	69,40	41,96	88,58	30,54
40,38	83,6	33,70	16,4	74,41	30,25	92,95	23,20
19,00	86,0	14,84	14,0	44,59	32,81	90,43	23,25
38,22	80,1	30,63	19,9	68,69	35,83	89,90	25,72
19,03	87,8	15,91	12,2	41,51	26,59	91,20	17,79
10,65	95,1	9,81	4,9	26,82	12,37	95,98	8,35
30,37	86,0	24,72	14,0	64,95	30,03	92,93	22,96
33,18	81,9	25,50	18,1	67,87	37,07	91,28	28,36
39,13	75,9	30,08	24,1	67,63	41,65	87,18	28,84
40,77	85,9	35,25	14,1	74,43	25,73	93,92	19,64
32,33	84,6	25,95	15,4	67,40	32,10	92,58	24,68
33,71	85,4	27,59	14,6	69,50	30,11	93,28	23,39
36,31	83,8	29,08	16,2	73,80	32,86	93,35	26,21
32,00	72,5	23,63	27,5	54,05	46,49	81,40	27,89
36,21	82,5	29,01	17,5	70,10	33,91	91,79	25,71
20,08	91,0	15,46	9,0	66,46	29,96	96,20	26,16
33,59	85,9	27,59	14,1	70,15	29,42	93,67	23,09
19,85	87,6	15,10	12,4	53,40	33,40	92,78	26,18
19,25	88,5	14,66	11,5	54,61	32,59	93,54	26,13



Şekil 4.40 : Kül uzaklaştırma oranının ayırma etkinliğine etkisi.



Şekil 4.41 : Yanabilir verimin ayırma verimine etkisi.

## 4.2.2 Yüksek kül içeren kömür zenginleştirmenin optimizasyonu

### 4.2.2.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon

Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılacak optimizasyon için tüm bağımsız değişkenler için çizilen grafiklerden ayırma şartları tespit edilmiş (Çizelge A.44). Her bir model için çalışma aralıkları belirlenmiş ve Çizelge 4.26'da verilmiştir. Her bir model için aşağıdaki bağımsız değişkenlerin gerçek değerleri için yanıt değişkenlerin alacağı değerler hesaplanmış ve Çizelge 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.26 : Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon.

Kombinasyon	Bağımsız Değişkenler				Kİ (%)
	G	PKO (%)	Boyut (µm)	BH (l/dk.)	
YV	250-300	30-45	38-106	2,5-3,5	10-20
TKV	180-300	30-45	38-106	2-3,5	10-20
ID	100-275	5-10	212-300	0,5-1,0	10-15
KUO	100-175	5-10	106-300	0,5-1	35-40

Çizelge 4.27'den de görülebileceği gibi yüksek küllü kömürlerin zenginleştirilmesinde, belirlenen yanıt değişkenleri aralıklarında (YV >% 95, TKV >% 95, KUO >% 23 ve ID >6200 kcal/kg), iki farklı ayırma şartı tespit edilmiştir. Zenginleştirme, düşük ya da yüksek G değerlerinde yapılabilir. Ancak PKO, tane boyutu ve besleme hızları ayarlanmalıdır. Yüksek G değerlerinde, yüksek PKO, 100 mikron gibi orta tane boyutunda yüksek hızlarda, düşük G değerlerinde ise düşük PKO, iri tane boyut ve yavaş besleme hızlarında çalışılmalıdır. Yanıt değişkenlerinin en yüksek değerleri için çalışma koşulları 300 G, % 30 PKO, 106 mikron tane boyutu ve 3,5 litre/dakika besleme hızı, düşük G değerleri için çalışma koşulları 100 G, % 10 PKO, 300 mikron tane boyutu ve 0,5 litre/dakika besleme hızı olarak bulunmuştur.

#### **4.2.2.2 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon**

Yanıt değişkenlerini belirleyecek olan bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve hedef değerleri verilmiştir. çekicilik fonksiyonu ile yapılan optimizasyon sonuçları Çizelge 4.28'de, yanıt değişkenlerin aldığı değerler ise Çizelge 4.29'da verilmiştir. Önem derecesi her yanıt değişkeni için 1 olarak alınmıştır.

Sonuç olarak, yüksek kül içeren kömürlerin zenginleştirilmesi için çekicilik fonksiyonu kullanılarak yapılan çalışmalarda optimum koşullar, G değeri 167, PKO % 43, tane boyutu 212 mikron ve besleme hızı 1 litre/dakika olarak belirlenmiştir.

#### **4.2.3 Yüksek kükürt içeren kömürlerin zenginleştirilmesi ve modellemesi**

Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirme deneyleri, Çizelge 3.6'da verilen bağımsız değişkenler ve aralıkları için MKT ile belirlenen deney sistematığına göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel yanıtlar olarak seçilen yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma oranı ve ayırma etkinliğinin gerçek değerleri Çizelge 4.30'da verilmiştir.

**Çizelge 4.27 :** Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan yanıt değişken değerleri.

	ID				YV				TKV				KUO			
G	100	<b>100</b>	275	275	250	250	<b>300</b>	300	180	180	300	300	100	100	175	175
PKO	5	<b>10</b>	5	10	30	45	<b>30</b>	45	30	45	30	45	5	10	5	10
Boyut	0,3	<b>0,3</b>	0,3	0,3	0,106	0,038	<b>0,106</b>	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,3	0,3	0,3	0,106
BH	0,5	<b>0,5</b>	0,5	0,5	3,5	3,5	<b>3,5</b>	3,5	2,0	2,0	3,5	3,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kİ	10	<b>10</b>	10	10	10	20	<b>10</b>	20	10	10	10	10	40	40	40	40
YV	93,6	<b>96,5</b>	90,7	93,6	<b>97,8</b>	<b>97,1</b>	<b>98,9</b>	<b>98,3</b>	<b>95,3</b>	94,8	<b>97,9</b>	<b>97,4</b>	79,5	82,7	78,3	84,2
TKV	94,1	<b>97,0</b>	92,4	95,2	<b>95,3</b>	92,0	<b>95,7</b>	92,4	96	93	<b>96,0</b>	93,0	63,3	67,4	63,4	70,4
KUO	28,2	<b>24,6</b>	27,0	23,4	23,3	30,2	<b>26,4</b>	33,0	14,0	22,8	23,1	33,8	70,0	63,0	65,6	55,2
ID	6472	<b>6421</b>	6111	6061	6227	6148	<b>6203</b>	6138	5950	6304	6207	6752	5682	5480	5604	5038

**Çizelge 4.28 :** Yüksek küllü kömür zenginleştirme için çekicilik fonksiyonu ile yanıt değişkenlerin optimizasyonu.

	G	PKO (%)	Boyut (mm)	BH (l/dk.)	Kİ (%)	YV (%)	Çekicilik	TKV (%)	Çekicilik	KUO (%)	Çekicilik	ID (kcal/kg)	Çekicilik	Toplam Çekicilik
YÇ	167	43	0,231	0,9	10,00	98,01	0,994	96,83	0,913	25,04	0,992	6222	0,946	0,961
YÇ	205	45	0,300	1,9	12,55	97,94	0,981	97,03	0,984	25,64	0,871	6199	0,997	0,957
YÇ	100	20	0,300	1,1	14,42	98,04	0,958	96,35	0,676	24,15	0,150	6090	0,450	0,457
YÇ	299	45	0,300	1,7	10,00	98,94	0,063	98,45	0,276	25,59	0,882	6087	0,433	0,285
YÇ	193	45	0,269	1,6	12,35	97,36	0,786	95,82	0,409	26,51	0,698	6182	0,909	0,672
YÇ	164	26	0,300	0,5	15,86	98,33	0,675	96,41	0,703	24,34	0,338	6056	0,282	0,461
YÇ	280	45	0,251	1,9	10,01	98	1,000	96,02	0,508	28,22	0,357	6205	0,987	0,650
YÇ	171	45	0,284	1,3	11,59	98	1,000	97,36	0,822	25,13	0,974	6211	0,973	0,939
YÇ	300	44	0,242	1,6	10,00	97,59	0,863	95,63	0,314	28,14	0,372	6054	0,268	0,405
YÇ	100	45	0,300	1,8	12,69	97,98	0,995	96,99	0,996	26,52	0,696	6171	0,855	0,876
YÇ	247	45	0,300	2,6	14,45	98,13	0,866	95,7	0,351	29,25	0,150	6165	0,825	0,440
<b>GÇ</b>	<b>167</b>	<b>43</b>	<b>0,231</b>	<b>0,9</b>	<b>10,00</b>	<b>98,01</b>	<b>0,994</b>	<b>96,83</b>	<b>0,913</b>	<b>25,04</b>	<b>0,992</b>	<b>6222</b>	<b>0,946</b>	<b>0,961</b>

YÇ: Yerel çözüm

GÇ: genel çözüm

**Çizelge 4.29 : Yanıt değişkenlerinin değerleri.**

Yanıt değişkenleri	Düşük	Hedef	Yüksek	Önem
Isıl Değer (kcal/kg)	6000	6200	6600	1
Yanabilir Verim (%)	95	98	99	1
Temiz Kömür Verimi (%)	95	97	99	1
Kül Uzaklaştırma Oranı (%)	24	25	30	1

**Çizelge 4.30 : Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme deneyleri için gerçek deneysel koşullar ve yanıtların gerçek değerleri.**

Deney no	Bağımsız değişkenler					Yanıt değişkenleri			
	G	PKO (%)	B (mm)	BH (l/dk.)	Sİ (%)	YV (%)	AV (%)	SUO (%)	AE (%)
1	250	35	0,106	2,75	3	95,67	94,46	39,06	33,51
2	300	25	0,150	2	4	93,54	92,29	67,29	59,58
3	250	35	0,212	1,25	3	94,75	93,75	36,33	30,08
4	250	15	0,212	2,75	3	92,38	90,55	43,45	34,00
5	250	35	0,212	2,75	5	93,09	90,17	64,19	54,37
6	150	35	0,106	1,25	3	95,36	94,06	38,66	32,72
7	250	15	0,106	1,25	3	92,33	90,72	45,04	35,76
8	200	25	0,300	2	4	93,08	91,83	69,21	61,03
9	200	25	0,150	2	4	93,56	91,37	57,81	49,18
10	200	25	0,150	3,5	4	94,27	92,02	55,67	47,69
11	150	35	0,212	2,75	3	94,19	92,86	43,86	36,71
12	200	25	0,150	2	2	94,64	93,87	15,01	8,88
13	150	15	0,106	2,75	3	92,89	91,27	38,53	29,80
14	200	25	0,150	2	4	93,33	90,48	54,27	44,75
15	150	15	0,212	1,25	3	91,31	89,86	38,44	28,30
16	200	25	0,150	2	4	93,84	91,87	58,90	50,76
17	200	25	0,150	2	4	93,37	90,94	56,92	47,87
18	250	15	0,212	1,25	5	90,26	86,84	69,23	56,07
19	200	25	0,150	2	4	93,75	91,30	58,61	49,91
20	200	25	0,150	2	4	93,70	92,27	66,68	58,95
21	150	15	0,212	2,75	5	90,67	88,77	69,29	58,06
22	250	15	0,106	2,75	5	90,99	88,91	68,55	57,46
23	200	25	0,150	0,5	4	92,01	90,13	55,34	45,47
24	200	25	0,038	2	4	95,85	93,38	44,29	37,66
25	250	35	0,106	1,25	5	94,15	91,32	66,75	58,07
26	200	45	0,150	2	4	95,14	92,88	55,20	48,08
27	150	35	0,212	1,25	5	92,87	90,37	65,37	55,74
28	150	35	0,106	2,75	5	94,20	90,89	62,87	53,76
29	100	25	0,150	2	4	93,12	91,09	59,79	50,88
30	150	15	0,106	1,25	5	90,37	87,01	68,09	55,10
31	200	5	0,150	2	4	81,08	78,89	61,60	40,49
32	250	35	0,106	2,75	3	91,53	88,00	75,18	63,18

YV: Yanabilir verim (%)

AV : Ayrırma verimi (%)

Sİ : Kükürt içeriği (%)

SUO: kükürt uzaklaştırma oranı (%)

AE : Ayrırma etkinliği (%)

#### 4.2.3.1 Yanabilir verim için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan yanabilir verimi ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.8).

$$\begin{aligned} Y_{YV2} = & 93,3267 + 0,1259X_1 + 2,0664X_2 - 0,4977X_3 + 0,2886X_4 - 0,7579X_5 \\ & + 0,0875X_1^2 - 1,2163X_2^2 + 0,3532X_3^2 + 0,0413X_4^2 + 0,0259X_5^2 \\ & + 0,0201X_1X_2 + 0,0859X_1X_3 - 0,0879X_1X_4 - 0,0628X_1X_5 - \\ & 0,3361X_2X_3 - 0,1647X_2X_4 + 0,0597X_2X_5 - 0,0574X_3X_4 + 0,0636X_3X_5 - \\ & 0,0042X_4X_5 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.8) model katsayılarına göre incelendiğinde, yanabilir verimi en fazla etkileyen bağımsız değişkenin PKO olduğu görülmektedir. Bunu kükürt içeriği ve tane boyutu takip etmektedir. Besleme hızı ve G değerinin ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin oldukları görülmektedir. Yanabilir verim modeli için, PKO, besleme hızı ve G değeri sistemi pozitif etkilerken, kükürt içeriği ve tane boyutunun etkisi ise negatif olduğu görülmektedir. PKO, besleme hızı ve G değerinin artması yanabilir verimin artmasına sebep olmaktadır. Kükürt içeriğinin artışı ve tane boyutunun büyümesi ise yanabilir verimi düşürmektedir. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

#### Varyans Analizi (ANOVA)

Yanabilir verim için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.31'de verilmiştir.

Modelin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.31'den görüldüğü gibi, model F değeri 3,75 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2'den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{hesaplanan} > F_{çizelge}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Yanabilir verim modeli için elde edilmiş olan P değeri (0,014)  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her



parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 4.31 : Yanabilir verim modeli için varyans analizi (ANOVA).**

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	<b>184,589</b>	<b>9,2295</b>	<b>3,75</b>	<b>0,014</b>
G	1	0,285	0,3495	0,14	0,713
PKO	1	109,204	94,0711	38,24	0,000
B	1	5,164	4,6215	1,88	0,198
BH	1	2,159	1,8345	0,75	0,406
Sİ	1	14,248	12,6535	5,14	0,044
G <sup>2</sup>	1	0,454	0,2206	0,09	0,770
PKO <sup>2</sup>	1	47,802	42,6628	17,34	0,002
B <sup>2</sup>	1	3,176	3,2178	1,31	0,277
BH <sup>2</sup>	1	0,044	0,0491	0,02	0,890
Sİ <sup>2</sup>	1	0,019	0,0194	0,01	0,931
G*PKO	1	0,006	0,0065	0,00	0,960
G*B	1	0,078	0,0780	0,03	0,862
G*BH	1	0,124	0,1237	0,05	0,827
G*Sİ	1	0,063	0,0630	0,03	0,876
PKO*B	1	1,195	1,1950	0,49	0,500
PKO*BH	1	0,434	0,4338	0,18	0,683
PKO*Sİ	1	0,057	0,0571	0,02	0,882
B*BH	1	0,035	0,0348	0,01	0,907
B*Sİ	1	0,043	0,0428	0,02	0,897
BH *Sİ	1	0,000	0,0003	0,00	0,992
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>27,058</b>	<b>2,4598</b>		
Uyum eksikliği	6	26,835	4,4725	100,41	0,000
Saf hata	5	0,223	0,0445		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>211,647</b>			

#### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Çizelge 4.31'den,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak yanabilir verim üzerinde etkin olan parametrelerin, PKO, Sİ ve PKO<sup>2</sup> kodlu değerleri ile verilen PKO ve kükürt içeriği olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin PKO ve kükürt içeriği olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra tane boyutu ve besleme hızı gelmektedir. G değerinin etkisi ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. PKO

ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki, kükürt içeriği ile yanıt arasında ise negatif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, PKO arttıkça yanabilir verimin artacağı, kükürt içeriğinin artmasının ise yanabilir verimi düşüreceğidir. PKO'nun yanıt üzerine negatif kuadratik etkisi vardır. Bu etki PKO'nun artışının yanabilir verimi artıacağı, artış devam ederse düşüreceğinin göstergesidir.

Yanabilir verim modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.32'de verilmiştir. Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen yanabilir verim modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.42'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere yanabilir verim için  $R^2$  değeri 0,8722 olarak belirlenmiştir. Yanabilir verim model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme işleminin % 87,22'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,64, korelasyon katsayısı 0,934, standart sapma ise 1,57 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.32 :** Yanabilir verim için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

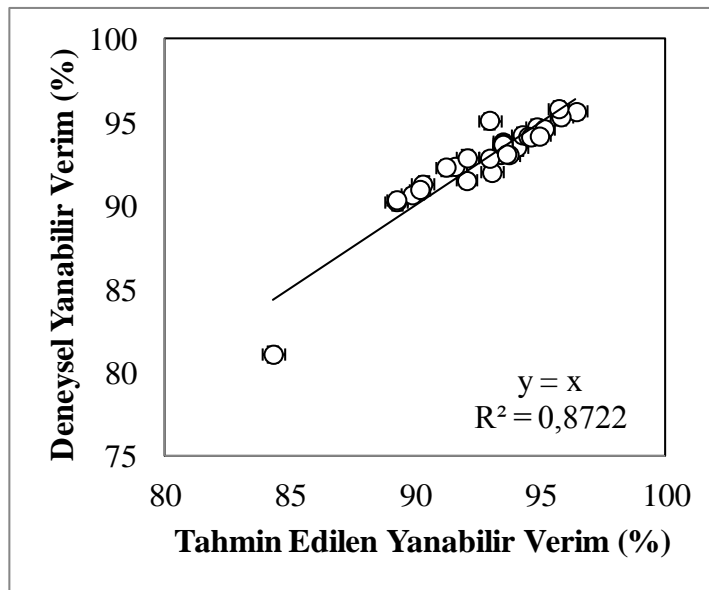
Deney No	Yanabilir Verim (%)			Deney No	Yanabilir Verim (%)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	95,67	96,44	-0,77	17	93,37	93,50	-0,14
2	93,54	94,05	-0,52	18	90,26	89,24	1,02
3	94,75	94,86	-0,11	19	93,75	93,50	0,25
4	92,38	91,58	0,80	20	93,70	93,50	0,20
5	93,09	93,41	-0,32	21	90,67	89,87	0,80
6	95,36	95,82	-0,46	22	90,99	90,18	0,81
7	92,33	91,22	1,11	23	92,01	93,05	-1,04
8	93,08	93,74	-0,66	24	95,85	95,77	0,11
9	93,56	93,50	0,06	25	94,15	94,61	-0,46
10	94,27	94,28	0,00	26	95,14	92,96	2,18
11	94,19	94,51	-0,32	27	92,87	92,97	-0,10
12	94,64	95,16	-0,52	28	94,20	94,96	-0,77
13	92,89	92,07	0,81	29	93,12	93,65	-0,53
14	93,33	93,50	-0,17	30	90,37	89,25	1,12
15	91,31	90,29	1,02	31	81,08	84,31	-3,22
16	93,84	93,50	0,34	32	91,53	92,05	-0,53

### Model uygunluk testleri

Katsayılarından sonra yanabilir verim modelinin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılarda test edilmiştir.

### Normalite varsayımı

Şekil 4.43'te kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.



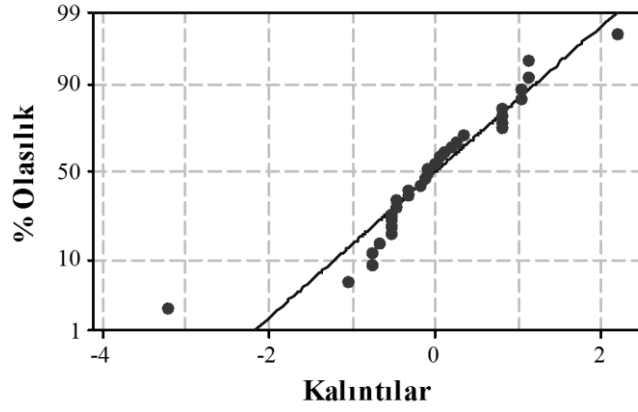
Şekil 4.42 : Yanabilir verim için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

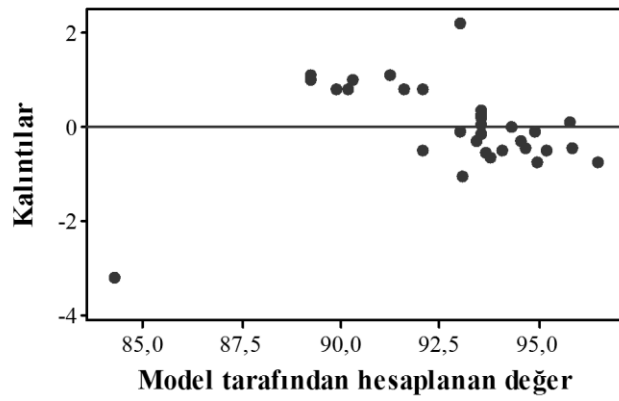
Şekil 4.44'de hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.

### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

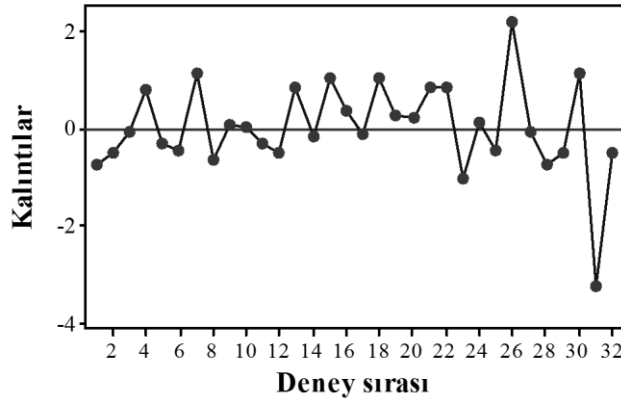
Şekil 4.45'de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.43 : Yanabilir verim için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.



Şekil 4.44 : Yanabilir verim için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.



Şekil 4.45 : Yanabilir verim için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

### Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri

Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.9'da verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve

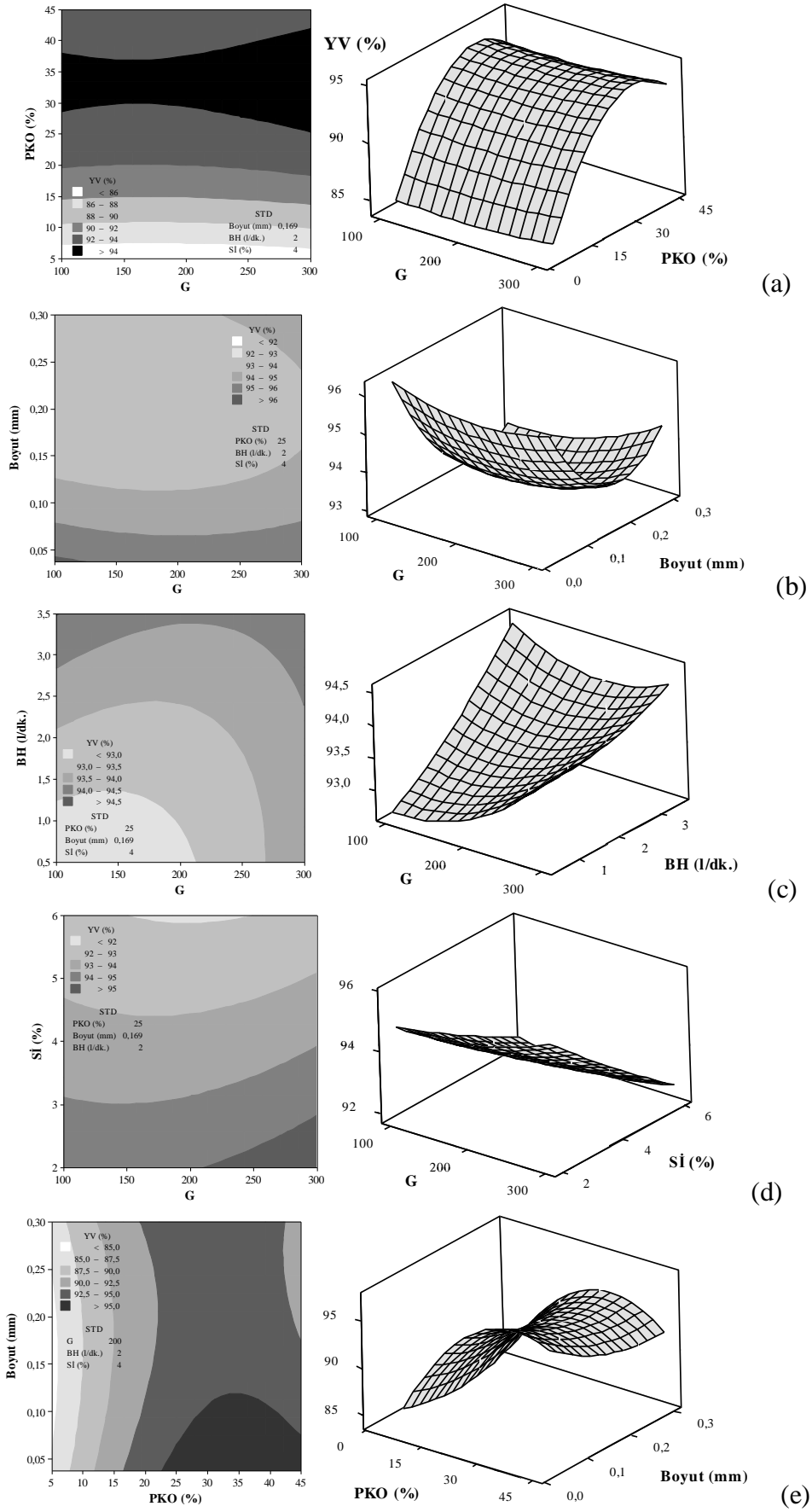
yanabilir verim üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.46'da verilmiştir.

Şekil 4.46 (a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO'nun yanabilir verime etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve yanabilir verimdeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak PKO'ya göre değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de en yüksek yanabilir verim değerlerinin % 30-40 PKO'larında elde edilebileceği görülmektedir.

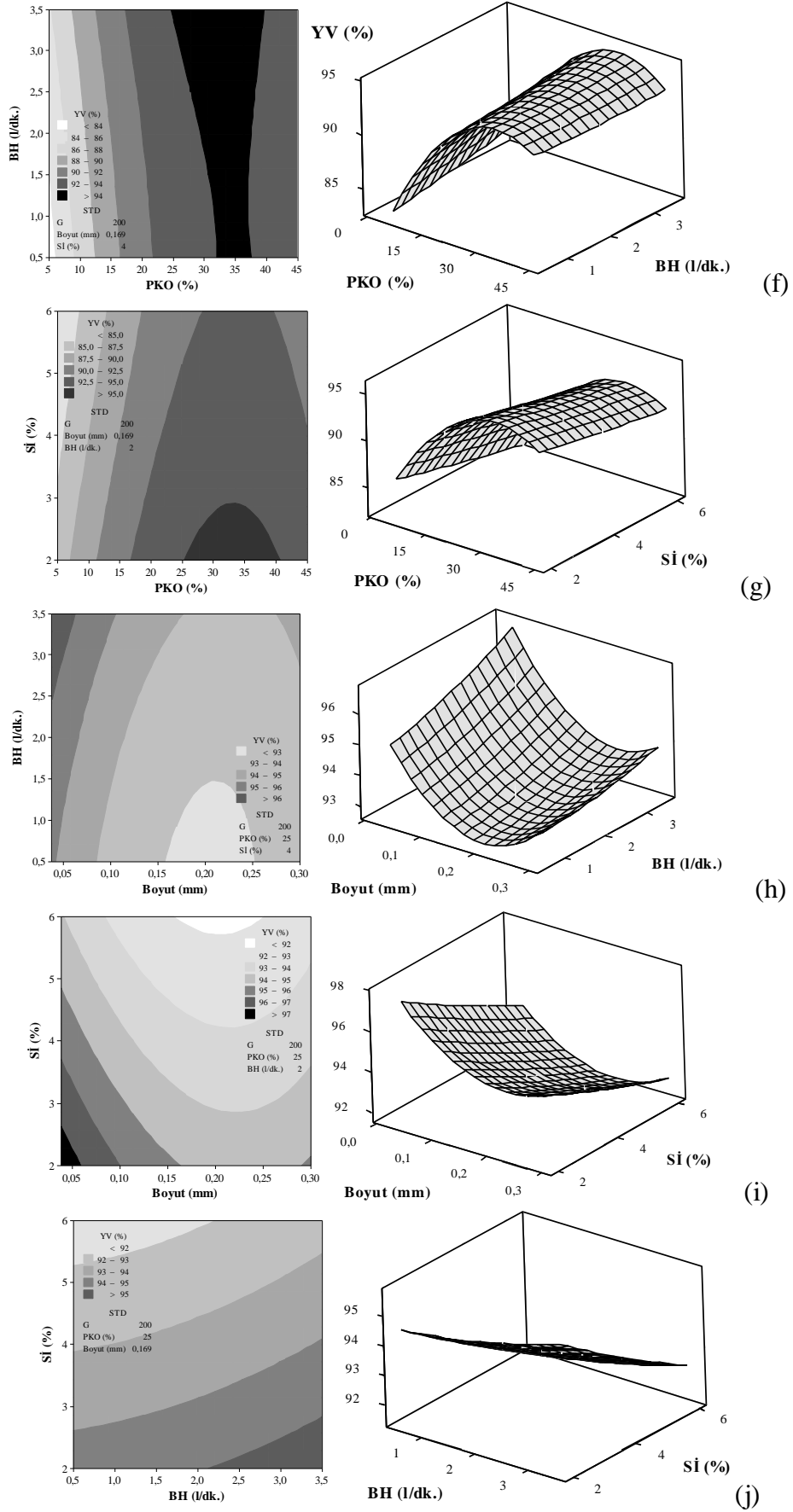
G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.46 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu, G ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin yanabilir verim için önemli olduğunu göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça verim artmaktadır. Kontur grafiğinden de, en iyi verim değerlerinin 106 mikrondan küçük tane boyutlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.46 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin azalan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Yüksek besleme hızlarında G önemini kaybetmektedir. En iyi verim değerleri yüksek besleme hızlarında elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de, 2,0 litre/dakika besleme hızlarında %94'ten büyük yanabilir verimleri elde edildiği görülmektedir.

Şekil 4.46 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ifade etmektedir. Yanabilir verimdeki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak kükürt içeriğinin değişimi ile değiştiğini göstermektedir. Kontur grafiğinden de en yüksek yanabilir verim değerlerine % 3'ten az kükürt içeriğinde ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.46 : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



Şekil 4.6 : Yanabilir verim için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri (devam).

Şekil 4.46 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden yanabilir verime olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin yanabilir verimi etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak yanabilir verimde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Bununla birlikte baskın olan parametre PKO olarak görülmektedir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, en yüksek yanabilir verim (% 95) PKO'nun %20'den büyük olduğu durumlarda 0,106 mm'nin altındaki tane boyutlarında elde edilebilir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kükürt içeriğinde (% 4), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının yanabilir verime etkileri görülmektedir (Şekil 4.46 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve yanabilir verimdeki değişimlerin besleme hızından bağımsız olarak PKO'ya bağlı olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden, en yüksek yanabilir verim değerlerine % 25-40 PKO'larda ulaşıldığı görülmektedir.

PKO ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.46 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde yanabilir verimin PKO değişiminden daha fazla etkilendiği görülür. Kontur grafiğinden ise yüksek yanabilir verim değerlerinin %25-40 PKO aralığında % 3'ten düşük kükürt içeriklerinde elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.46 (h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Tane boyutunun azalışı ve besleme hızının artışı yanabilir verimi olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinde, en yüksek yanabilir verimin 100 mikrondan küçük tane boyutlarında 2,5 litre/dakikadan hızlı besleme hızlarında elde edilebileceği görülmektedir.



Sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika), tane boyutu ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğriler Şekil 4.46 (i)'de görülmektedir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Tane boyutunun ve kükürt içeriğinin azalışı yanabilir verimi olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinden en yüksek yanabilir verim değerlerine 106 mikron altında %3,5'tan az kükürt içeriklerinde ulaşılabileceği görülmektedir.

Şekil 4.46 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiği durağan sırt yapısındadır ve yanabilir verim kükürt içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Kontur grafiğinden, %94'ten büyük yanabilir verimlerin %3'ten daha az kükürt içerikleri için elde edilebileceği görülmektedir.

#### 4.2.3.2 Ayırma verimi için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan ayırma verimini ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.9).

$$\begin{aligned}
 Y_{AV} = & 91,1638 + 0,1236X_1 + 2,1106X_2 - 0,3174X_3 + 0,3047X_4 - 1,4341X_5 \\
 & + 0,2047X_1^2 - 1,2454X_2^2 + 0,4215X_3^2 + 0,0516X_4^2 + 0,0173X_5^2 \\
 & + 0,0879X_1X_2 - 0,2216X_1X_3 - 0,0633X_1X_4 - 0,0770X_1X_5 - \\
 & 0,2663X_2X_3 - 0,3872X_2X_4 - 0,0951X_2X_5 - 0,0838X_3X_4 \\
 & + 0,1173X_3X_5 + 0,1545X_4X_5
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.9) model katsayılarına göre incelendiğinde, ayırma verimini en fazla etkileyen bağımsız değişkenin PKO olduğu görülmektedir. Bunu kükürt içeriği takip etmektedir. Tane boyutu, besleme hızı ve G değerinin ise daha az etkin oldukları görülmektedir. PKO, besleme hızı ve G değeri sistemi pozitif etkilerken, kükürt içeriği ve tane boyutunun etkisi ise negatif olduğu görülmektedir. PKO, besleme hızı ve G değerinin artması ayırma veriminin artmasına sebep olmaktadır. Kükürt içeriğinin artışı ve tane boyutunun büyümesi ise ayırma verimini düşürmektedir. Ancak, kesin olarak hangi parametrelerin etkin olduğu ANOVA testi ile söylenebilir.

## Varyans Analizi (ANOVA)

Ayrırma verimi için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.33'te verilmiştir.

Modelin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.33'den görüldüğü gibi, model F değeri 495 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2'den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{hesaplanan} > F_{çizelge}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

**Çizelge 4.33 : Ayrırma verim modeli için varyans analizi (ANOVA).**

Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	<b>230,417</b>	<b>11,5208</b>	<b>4,95</b>	<b>0,005</b>
G	1	0,674	0,3368	0,14	0,711
PKO	1	112,335	98,1404	42,20	0,000
B	1	2,275	1,8804	0,81	0,388
BH	1	2,478	2,0450	0,88	0,368
Sİ	1	50,977	45,3117	19,49	0,001
G <sup>2</sup>	1	1,644	1,2085	0,52	0,486
PKO <sup>2</sup>	1	50,695	44,7267	19,23	0,001
B <sup>2</sup>	1	4,560	4,5831	1,97	0,188
BH <sup>2</sup>	1	0,072	0,0768	0,03	0,859
Sİ <sup>2</sup>	1	0,009	0,0087	0,00	0,952
G*PKO	1	0,124	0,1236	0,05	0,822
G*B	1	0,519	0,5194	0,22	0,646
G*BH	1	0,064	0,0640	0,03	0,871
G*Sİ	1	0,095	0,0948	0,04	0,844
PKO*B	1	0,750	0,7501	0,32	0,581
PKO*BH	1	2,399	2,3987	1,03	0,332
PKO*Sİ	1	0,145	0,1446	0,06	0,808
B*BH	1	0,074	0,0743	0,03	0,861
B*Sİ	1	0,145	0,1455	0,06	0,807
BH *Sİ	1	0,382	0,3821	0,16	0,693
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>25,579</b>	<b>2,3253</b>		
Uyum eksikliği	6	23,546	3,9243	9,65	0,012
Saf hata	5	2,033	0,4065		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>255,996</b>			

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Ayrırma verimi modeli için elde edilmiş olan P değeri (0,005)  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her

parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.33'ten,  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak ayırma verimi üzerinde etkin olan parametrelerin, PKO, Sİ ve PKO<sup>2</sup> kodlu değerleri ile verilen PKO ve kükürt içeriği olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların incelenmesi ile en etkin parametrenin PKO ve kükürt içeriği olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra tane boyutu, besleme hızı ve G değeri gelmekte, ancak etkilerinin diğer bağımsız değişkenlere göre daha az olduğu görülmektedir. PKO ile yanıt arasında pozitif doğrusal etki, kükürt içeriği ile yanıt arasında ise negatif doğrusal etki saptanmıştır. Bunun anlamı, PKO arttıkça ayırma veriminin artacağı, kükürt içeriğinin artmasının ise ayırma verimini düşüreceğidir. PKO'nun yanıt üzerine negatif kuadratik etkisi vardır. Bu etki PKO'nun artışının ayırma verimini artıacağı, artış devam ederse düşüreceğinin göstergesidir.

Ayırma verimi modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.34'de verilmiştir. Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen ayırma verimi modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.47'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere ayırma verimi için R<sup>2</sup> değeri 0,90 olarak belirlenmiştir. Ayırma verimi model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme işleminin % 90,01'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj. R<sup>2</sup>' değeri 0,72, korelasyon katsayısı 0,95, standart sapma ise 1,52 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermektedir.

### **Model uygunluk testleri**

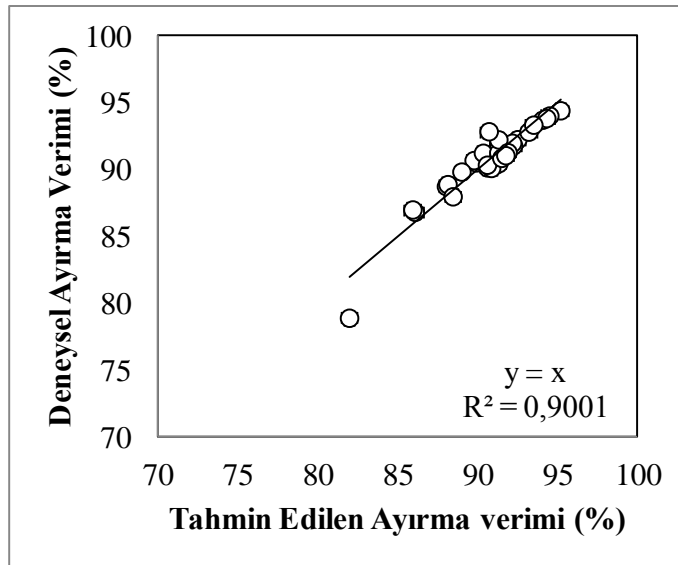
Katsayılardan sonra ayırma verimi modelinin uygunluğunu tanımlamak için kalıntılarda test edilmiştir.

### **Normalite varsayımı**

Şekil 4.48'de kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.

**Çizelge 4.34 :** Ayırma verimi için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

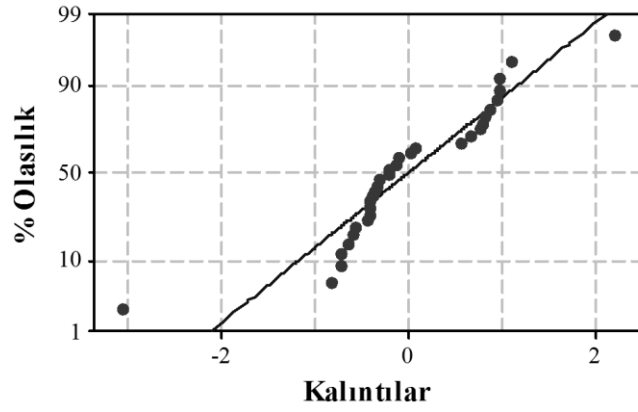
Deney No	Ayırma Verimi (%)			Deney No	Ayırma Verimi (%)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	94,46	95,1781	-0,72	17	90,94	91,2913	-0,35
2	92,29	92,486	-0,20	18	86,84	86,0526	0,79
3	93,75	94,0517	-0,30	19	91,30	91,2913	0,01
4	90,55	89,8779	0,67	20	92,27	91,2913	0,98
5	90,17	90,5917	-0,42	21	88,77	88,0088	0,76
6	94,06	94,4875	-0,42	22	88,91	88,1044	0,81
7	90,72	89,7436	0,98	23	90,13	90,8397	-0,71
8	91,83	92,2148	-0,39	24	93,38	93,4846	-0,11
9	91,37	91,2913	0,08	25	91,32	91,8704	-0,56
10	92,02	92,1557	-0,14	26	92,88	90,6856	2,20
11	92,86	93,1814	-0,33	27	90,37	90,5796	-0,21
12	93,87	94,297	-0,42	28	90,89	91,4803	-0,59
13	91,27	90,3278	0,94	29	91,09	91,7343	-0,65
14	90,48	91,2913	-0,81	30	87,01	85,9065	1,11
15	89,86	88,9788	0,88	31	78,89	81,9341	-3,04
16	91,87	91,2913	0,57	32	88,00	88,4244	-0,42



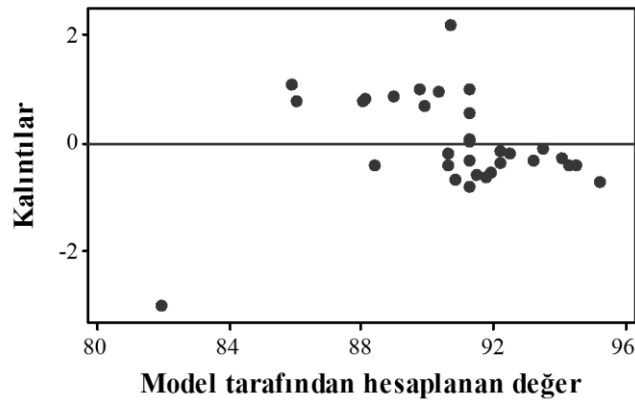
**Şekil 4.47 :** Ayırma verimi için hesaplanan gerçek değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

#### **Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı**

Şekil 4.49’da hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



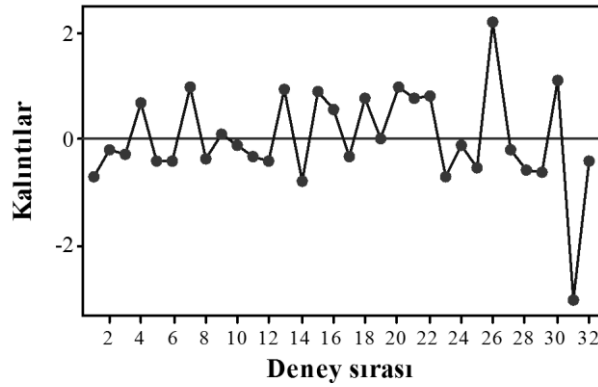
Şekil 4.48 : Ayırma verimi için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.



Şekil 4.49 : Ayırma verimi için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

#### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

Şekil 4.50'de deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir



Şekil 4.50 : Ayırma verimi için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

## **Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri**

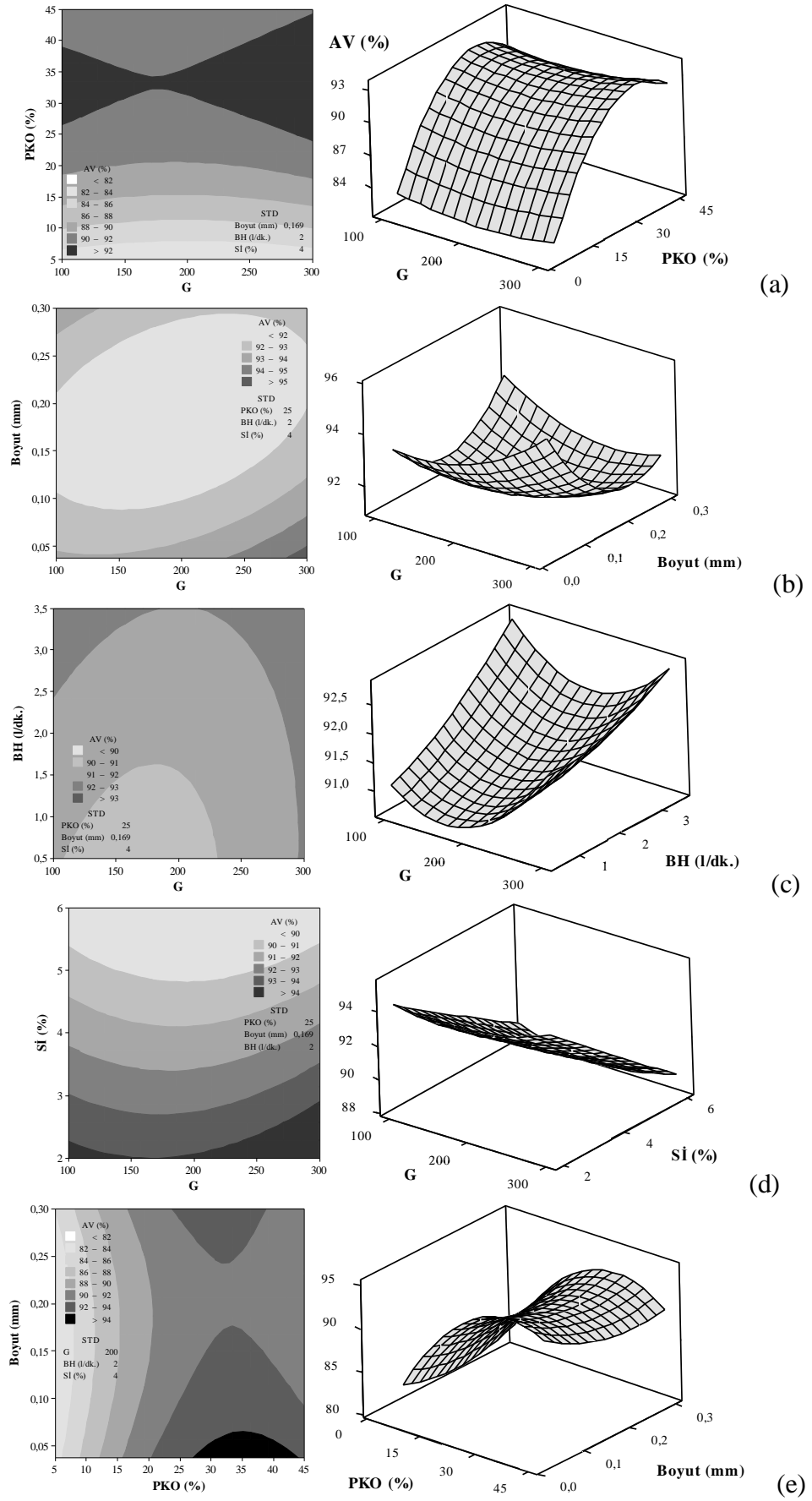
Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan değerler (STD), Çizelge 3.9'da verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve ayırma verimi üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.51'de verilmiştir.

Şekil 4.51 (a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO'nun ayırma verimine etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve PKO arasındaki iç etkileşimin ayırma verimini etkilediğini göstermektedir. Bununla birlikte baskın olan parametre PKO olarak görülmektedir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, % 92'lik bir ayırma verimi %30-35 PKO aralığında elde edilebilir.

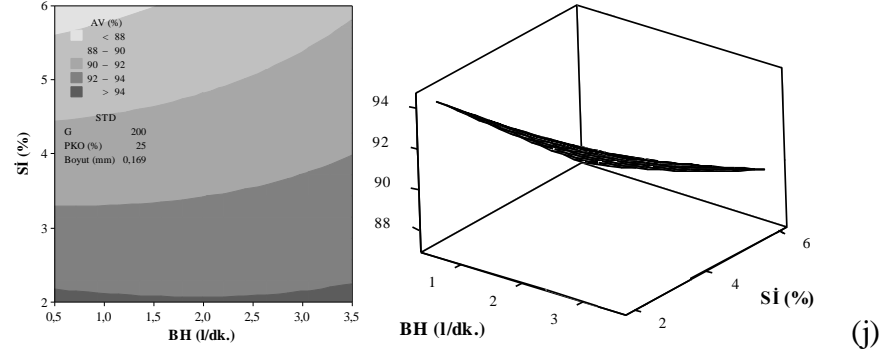
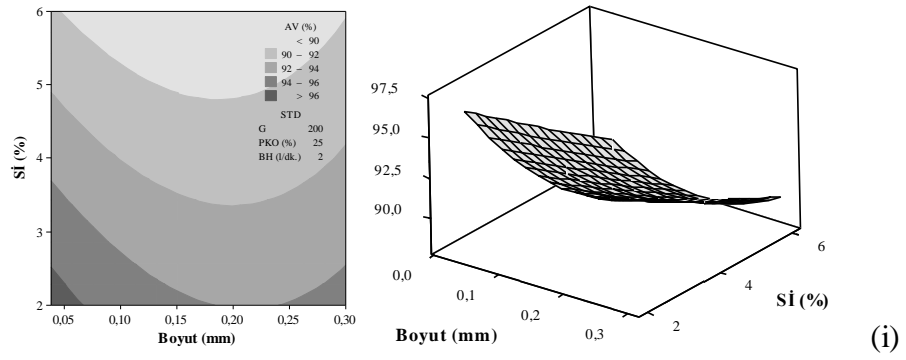
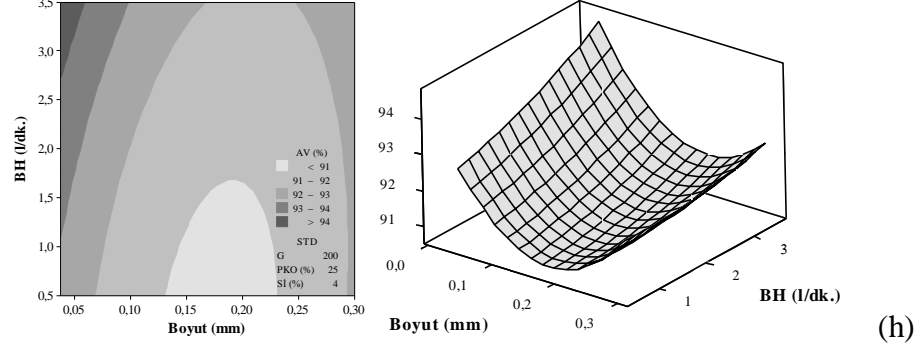
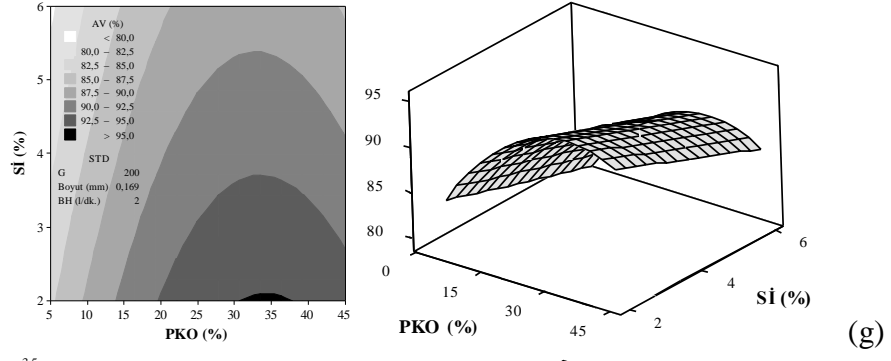
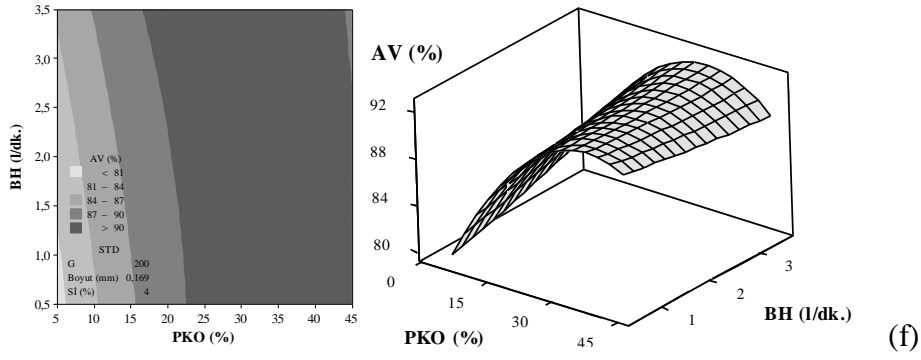
G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.51 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı minimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu, G ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin ayırma verimi için önemli olduğunu göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça verim artmaktadır. Kontur grafiğinden de, en iyi verim değerlerinin 100-150 G aralığında 106 mikrondan küçük tane boyutlarında elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.51 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin azalan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. G değerinin artış ve azalışına bağlı olarak ayırma verimi de artıp azalmaktadır. En iyi ayırma verimi 250-300 G aralığında 2,5 litre/dakikadan daha fazla besleme koşullarında elde edilmiştir.

Şekil 4.51 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin azalan sırt yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir.



Şekil 4.51 : Ayırma verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri.



Şekil 4.51 : Ayırma verimi için çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri (devam).



Ayırma verimi G değerinden bağımsız kükürt içeriğine göre değişmektedir. Ayırma etkinliğinin, % 3'ten az kükürt içeriğinde % 93'ün üzerine çıktığı kontur grafiğinde görülmektedir.

Şekil 4.51 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden ayırma verimine olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin ayırma verimini etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak ayırma veriminde artma ya da azalma olduğu görülmektedir. Kontur grafiğinden de görüldüğü üzere, % 92 üzerinde bir ayırma verimi, PKO'nun % 20-45 aralığında 150 mikron altındaki tane boyutlarında elde edilebilir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kükürt içeriğinde (% 4), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının ayırma verimine etkileri görülmektedir (Şekil 4.51 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve ayırma verimindeki değişimlerin besleme hızından bağımsız olarak PKO'ya bağlı olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden, en yüksek ayırma verimi değerlerine % 20'den büyük PKO'larda ulaşıldığı görülmektedir.

PKO ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.51 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde ayırma verimi PKO değişiminden daha fazla etkilendiği görülür. Kontur grafiğinden ise yüksek ayırma verimi değerlerinin % 25'ten büyük PKO'larda % 3,5'ten düşük kükürt içeriklerinde elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.51 (h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin dairesel yapısı tane boyutu ve besleme hızı arasındaki ilişkinin ihmal edilebilir olduğunu ifade eder. Kontur grafiğinden, en yüksek ayırma verimlerinin 1 litre/dakikadan hızlı beslemelerde 100 mikron altındaki malzemelerde elde edildiği görülmektedir.

Sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika), tane boyutu ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğriler Şekil 4.51 (i)'de görülmektedir. Azalan sırt yapısında olan yanıt yüzeyi grafiği, durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade etmektedir. Tane boyutunun ve kükürt içeriğinin azalışı ayırma verimini olumlu etkilemektedir. Kontur grafiğinden en yüksek ayırma verimlerine 150 mikron altında %3,5'tan az kükürt içeriklerinde ulaşılabileceği görülmektedir.

Şekil 4.51 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiği durağan sırt yapısındadır ve ayırma verimi kükürt içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Kontur grafiğinden, %92'den büyük ayırma verimlerinin %3,5'ten daha az kükürt içerikleri için elde edilebileceği görülmektedir.

#### 4.2.3.3 Kükürt uzaklaştırma oranı için model denklemi

YYY kullanılarak yanıt değişkeni olan kükürt uzaklaştırma oranını ifade eden regresyon modeli aşağıdaki gibi bulunmuştur (4.10).

$$\begin{aligned}
 Y_{SUO} = & 59,5915 + 0,6913X_1 - 1,4791X_2 + 2,6131X_3 + 0,4247X_4 + 13,7953X_5 \\
 & + 0,8571X_1^2 - 0,4287X_2^2 - 0,6472X_3^2 - 1,1525X_4^2 - 3,7555X_5^2 - 1,0214X_1X_2 \\
 & - 1,2452X_1X_3 - 0,3806X_1X_4 - 0,0801X_1X_5 + 0,1776X_2X_3 \\
 & + 0,2401X_2X_4 - 0,5264X_2X_5 + 1,6058X_3X_4 - 0,0495X_3X_5 - 0,6852X_4X_5
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Genel bir izlenim vermesi açısından, denklem (4.10) model katsayılarına göre incelendiğinde, kükürt uzaklaştırma oranını en fazla etkileyen bağımsız değişkenin kükürt içeriği olduğu görülmektedir. Bunu sırası ile tane boyutu ve PKO takip etmektedir. Besleme hızı ve G değerinin ise diğer parametrelere nazaran daha az etkin olduğu görülmektedir. Kükürt uzaklaştırma verimini model için, kükürt içeriği, tane boyutu, G değeri ve besleme hızı sistemi pozitif etkilerken, PKO'nun etkisi negatif yönde olmaktadır.

#### Varyans Analizi (ANOVA)

Kükürt uzaklaştırma oranı için üretilen modelin hassasiyetini, uygunluğunu ve yeterliliğini belirlemek amacı ile yapılan varyans analizleri (ANOVA) Çizelge 4.35'te verilmiştir.

Kükürt uzaklaştırma oranı modelinin geçerliliği test etmek için 0,05 anlamlılık düzeyi (%95 güven aralığı) seçilmiştir. Çizelge 4.35'ten görüldüğü gibi, model F değeri 9,41 olarak bulunmuştur ve Çizelge A.2'den 2,31 olarak okunan  $F_{0,05(20,11)}$  değerinden büyük çıkmıştır.  $F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{çizelge}}$  şartı sağlandığından dolayı kullanılan regresyon modelinin sistemi matematiksel olarak ifade ettiği kabul edilmiştir.

**Çizelge 4.35 : Kükürt uzaklaştırma oranı modeli için varyans analizi (ANOVA).**

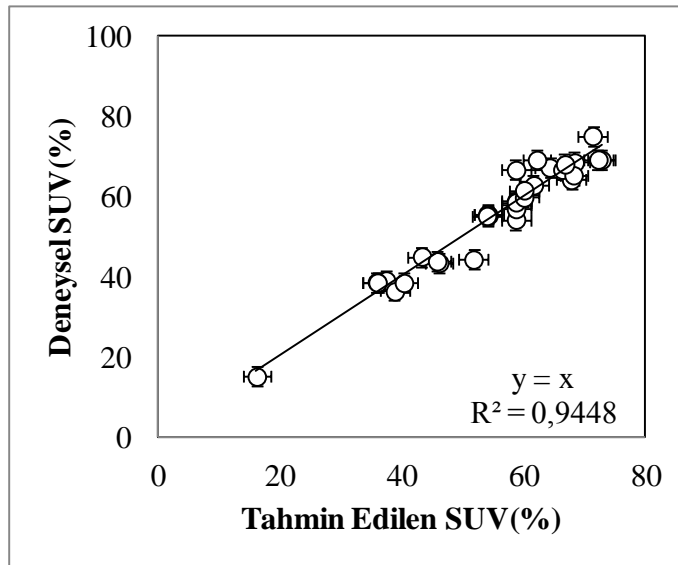
Değişimin Kaynağı	DF	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	Prob>F
<b>Regresyon</b>	<b>20</b>	<b>5329,74</b>	<b>266,49</b>	<b>9,41</b>	<b>0,000</b>
G	1	21,13	10,53	0,37	0,554
PKO	1	55,04	48,20	1,70	0,219
B	1	128,86	127,41	4,50	0,057
BH	1	0,27	3,97	0,14	0,715
Sİ	1	4573,95	4192,68	148,07	0,000
G <sup>2</sup>	1	49,79	21,18	0,75	0,406
PKO <sup>2</sup>	1	0,00	5,30	0,19	0,674
B <sup>2</sup>	1	0,17	10,80	0,38	0,549
BH <sup>2</sup>	1	17,79	38,31	1,35	0,269
Sİ <sup>2</sup>	1	406,73	406,73	14,36	0,003
G*PKO	1	16,69	16,69	0,59	0,459
G*B	1	16,40	16,40	0,58	0,463
G*BH	1	2,32	2,32	0,08	0,780
G*Sİ	1	0,10	0,10	0,00	0,953
PKO*B	1	0,33	0,33	0,01	0,916
PKO*BH	1	0,92	0,92	0,03	0,860
PKO*Sİ	1	4,43	4,43	0,16	0,700
B*BH	1	27,27	27,27	0,96	0,347
B*Sİ	1	0,03	0,03	0,00	0,976
BH *Sİ	1	7,51	7,51	0,27	0,617
<b>Kalan Hatası</b>	<b>11</b>	<b>311,46</b>	<b>28,31</b>		
Uyum eksikliği	6	224,39	37,40	2,15	0,210
Saf hata	5	87,07	17,41		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>5641,20</b>			

#### **Model katsayılarının anlamlılığını ölçme testleri**

Seçilen anlamlılık düzeyi gereğince model için hesaplanan Prob>F değeri 0,05'ten küçük ( $P < 0,05$ ) olmalıdır. Kükürt uzaklaştırma oranı modeli için elde edilmiş olan P değeri ( $< 0,001$ )  $P < 0,05$  koşulunu sağlamaktadır. Aynı şartlar modeli oluşturan her parametreye de uygulanarak, incelenen parametrelerden hangisinin ayırmada daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.35'ten  $P < 0,05$  koşulunu sağlayarak kükürt uzaklaştırma oranı üzerinde etkin olan parametrenin  $S\bar{I}$  ve  $S\bar{I}^2$  kodlu değerleri ile verilen kükürt içeriği olduğu görülmektedir. F, P ve katsayıların incelenmesi ile de en etkin parametrenin kükürt içeriği olduğu anlaşılmıştır. Daha sonra tane boyutu ve PKO gelmektedir. G değerinin ve besleme hızının etkileri ise diğer bağımsız değişkenlere göre daha azdır. Kükürt içeriği ile yanıt arasında pozitif doğrusal ve negatif kuadratik etki görülmektedir. Bunun anlamı, kükürt içeriği arttıkça kükürt uzaklaştırma oranının artacağı, ancak kükürt içeriğinin daha da artması ile uzaklaştırma oranının düşeceği'dir.

Kükürt uzaklaştırma oranı modelinden elde edilen değerler ile deneysel olarak bulunan değerlerinin karşılaştırması yapılmış ve Çizelge 4.36'da verilmiştir. Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirme deneyleri sonucunda üretilen kükürt uzaklaştırma oranı modelinin regresyon katsayısı Şekil 4.52'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere kükürt uzaklaştırma oranı için  $R^2$  değeri 0,9448 olarak belirlenmiştir. Kükürt uzaklaştırma oranı model denklemi, Falcon ayırıcısı ile yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme işleminin % 94,48'ini açıklamaktadır. Ayrıca Adj.  $R^2$  değeri 0,8444, korelasyon katsayısı 0,972, standart sapma ise 5,32 olarak bulunmuştur. Bu değerler bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin normalize edilmiş ayırma verimi açısından kabul edilebilir bir ilişki olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.52** : Kükürt uzaklaştırma oranı için hesaplanan gerçekte değerlere karşı deneysel değerlerin dağılımı.

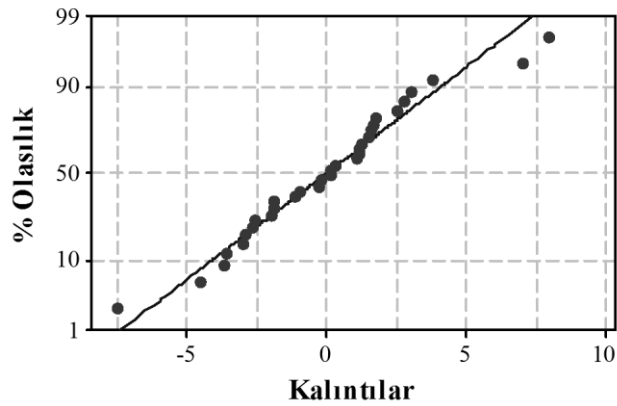
**Çizelge 4.36 :** Kükürt uzaklaştırma oranı için deney sonuçlarının ve model sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney No	Kükürt Uzaklaştırma Oranı (%)			Deney No	Kükürt Uzaklaştırma Oranı (%)		
	Deneysel	Tahmin	Hata		Deneysel	Tahmin	Hata
1	39,06	37,406	-0,34	17	56,92	58,7791	-1,86
2	67,29	64,3123	0,19	18	69,23	72,8423	-3,61
3	36,33	38,8585	-1,67	19	58,61	58,7791	-0,17
4	43,45	46,1406	2,43	20	66,68	58,7791	7,90
5	64,19	67,8478	1,52	21	69,29	72,3194	-3,03
6	38,66	35,8997	-2,79	22	68,55	68,4237	0,13
7	45,04	43,3261	-0,21	23	55,34	54,2512	1,09
8	69,21	62,2291	3,87	24	44,29	51,7767	-7,49
9	57,81	58,7791	-0,53	25	66,75	66,3991	0,35
10	55,67	54,0868	-1,34	26	55,20	54,003	1,19
11	43,86	45,8017	1,77	27	65,37	68,2357	-2,87
12	15,01	16,1377	1,54	28	62,87	61,6946	1,17
13	38,53	35,996	0,61	29	59,79	60,1025	-0,31
14	54,27	58,7791	-2,38	30	68,09	66,8535	1,23
15	38,44	40,3418	-0,12	31	61,60	60,1257	1,48
16	58,90	58,7791	1,79	32	75,18	71,3764	3,80

### Model uygunluk testleri

#### Normalite varsayımı

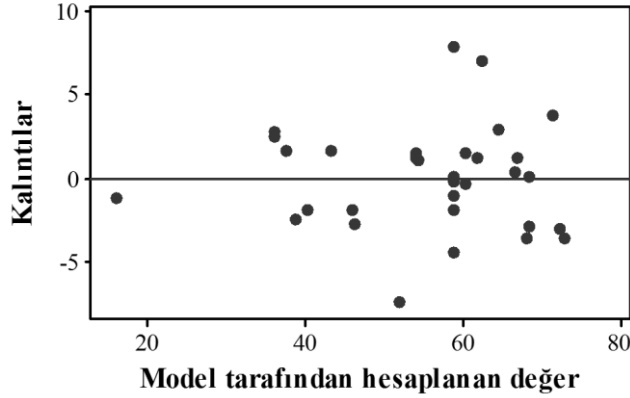
Şekil 4.53'te kareler farkının yüzde olasılığına göre dağılımı verilmiştir. Bu grafikten noktaların olasılık çizgisinin her iki tarafında homojen bir dağılım sergilediği ve olasılık doğru eğrisinin düz bir çizgiyi andırdığı görülmektedir. Bu durum istenilen bir sonuçtur.



**Şekil 4.53 :** Kükürt uzaklaştırma oranı için kalıntıların % olasılığa göre dağılımı.

### Kalıntıların Model Değerlerine Göre Karşılaştırmalı Diyagramı

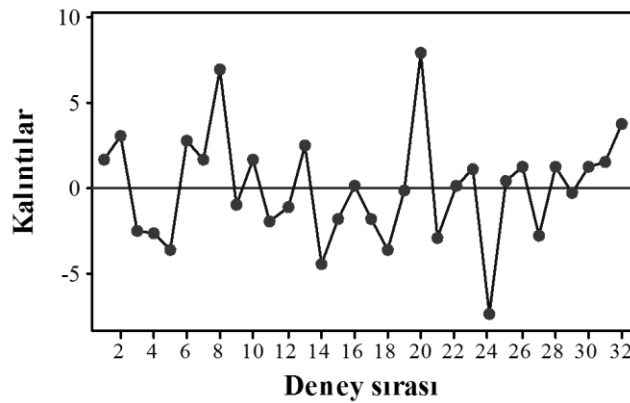
Şekil 4.54'te hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere sıfır ekseninin altında ve üstünde rastgele bir dağılım söz konusudur. Bu durum istenilen bir sonuç olup modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.54 : Kükürt uzaklaştırma oranı için hesaplanan değerlere karşı kalıntıların dağılımı.

### Zaman Sıralamasında Kalıntıların İşaretlenmesi

Şekil 4.55'te deney numarasına göre kareler farkının dağılımı verilmektedir. Bu grafiklerden sıfır çizgisinin alt ve üst kısmında noktaların eşit sayıda ve rastgele dağılımını görülmektedir. Bu durum istenilen bir durumdur ve kuadratik modelden kaynaklanan bir hatanın olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.55 : Kükürt uzaklaştırma oranı için kalıntıların veri toplama sırasına göre çizimi.

### Bağımsız değişkenlerin zenginleştirmeye etkileri

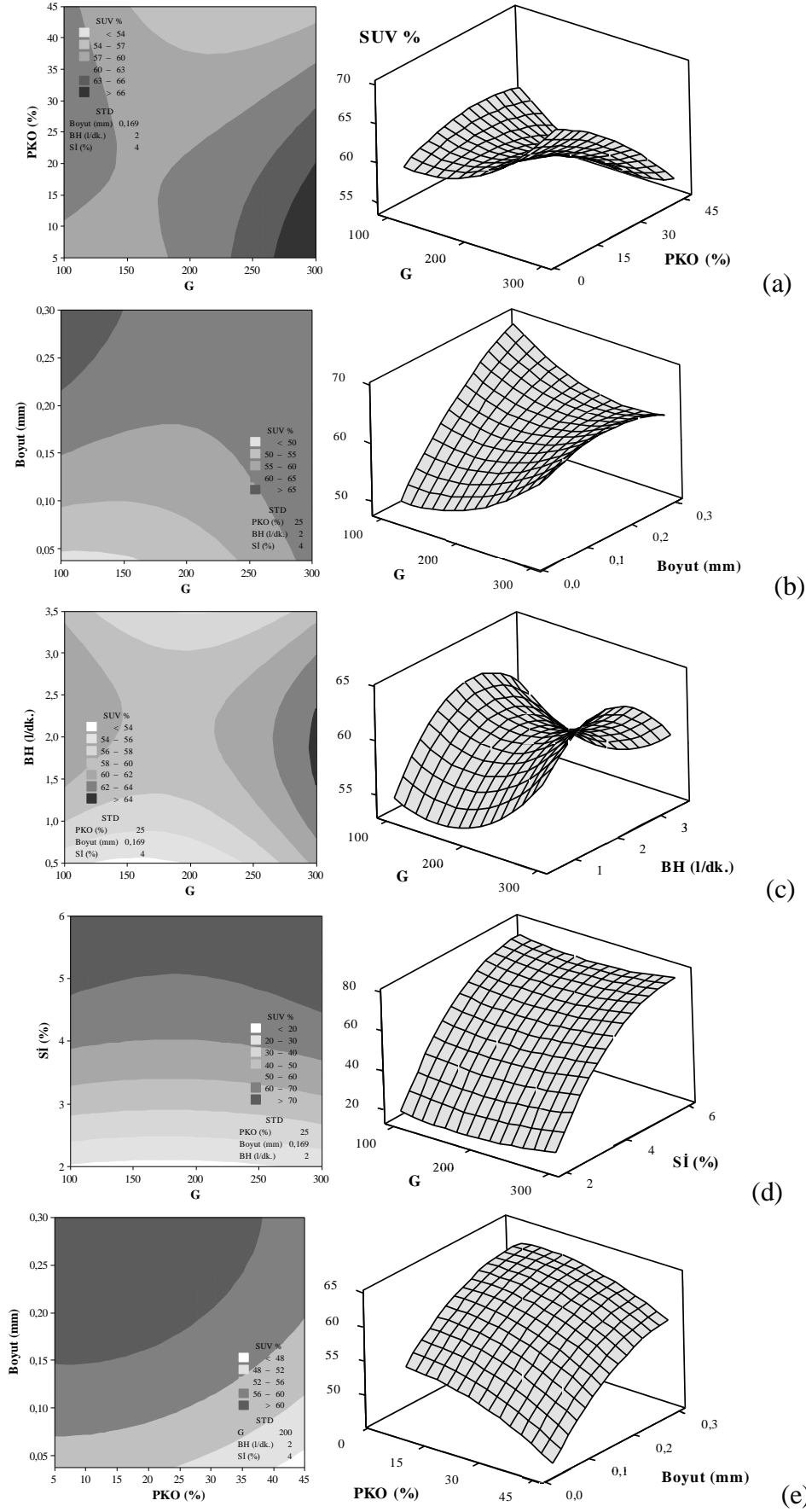
Çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, seçilen değişkenlerden ikisinin fonksiyonu olarak, diğer üç değişkenin sabit tutulduğu koşullar için çizilmiştir. Bu sabit tutulan

değerler (STD), Çizelge 3.7'de verilen orta (0) değişken seviyelerinin gerçek değerleri olarak alınmıştır. Bağımsız değişkenlerin birbirleri ile ilişkilerinin ve kükürt uzaklaştırma oranı üzerine olan etkilerinin incelenmesi amacı ile çizilen yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri Şekil 4.56'da verilmiştir.

Şekil 4.56 (a)'da sabit tane boyutu (-0,150 mm), besleme miktarı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4), G ve PKO'nun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden G ve PKO'nun kükürt uzaklaştırma oranına etkileri görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve PKO arasındaki iç etkileşimin kükürt uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kükürt uzaklaştırma oranında artış ya da azalış görülmektedir. En yüksek verime G değerinin yüksek, PKO değerinin ise düşük olduğu şartlarda ulaşılmıştır. Kontur grafiğinden de % 63 üzerinde verimlere 225 G'nin üzerinde ve % 25 PKO'nun altında ulaşılabileceği görülmektedir.

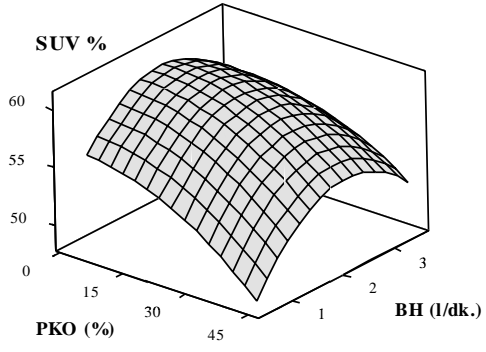
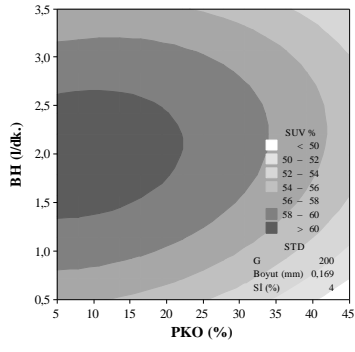
G ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen grafikler Şekil 4.56 (b)'de verilmiştir. PKO % 25, besleme hızı 2 litre/dakika ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiği eyer nokta yapısındadır. En yüksek verimler iri boyutta düşük G değerlerinde elde edilmiştir. Kontur grafiği, % 65 kükürt uzaklaştırma oranı için 212 mikrondan iri besleme ve 100-150 G aralığında çalışılması gerektiğini göstermektedir.

Şekil 4.56 (c)'de görülen grafikler, G ve besleme hızının fonksiyonu olarak, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin eyer nokta yapısı durağan noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve G ve besleme hızı arasındaki iç etkileşimin kükürt uzaklaştırma oranını etkilediğini göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaştıkça gidilen yöne bağlı olarak kükürt uzaklaştırma oranında artış ya da azalış görülmektedir. En yüksek verim yüksek G değerlerinde elde edilmiştir. Kontur grafiğinden de, G değerinin 275'ten büyük olduğu durumlarda 1-3 litre/dakikalık besleme hızlarında % 62'den yüksek kükürt uzaklaştırma verimleri elde edilebileceği görülmektedir.

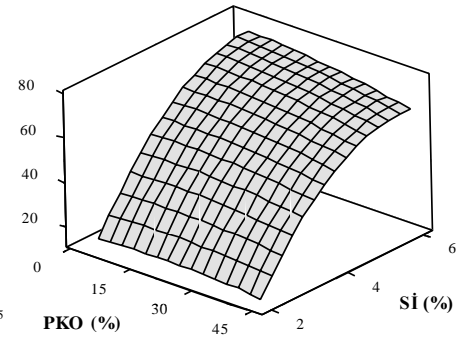
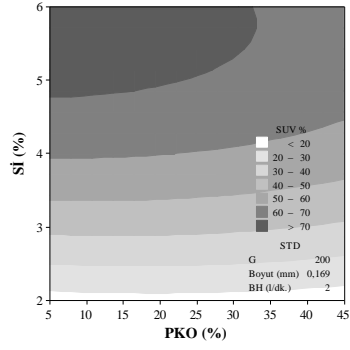


Şekil 4.56 : Kükürt uzaklaştırma oranı için yanıt yüzey ve kontur grafikleri.

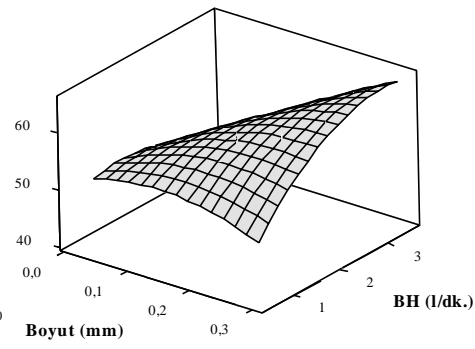
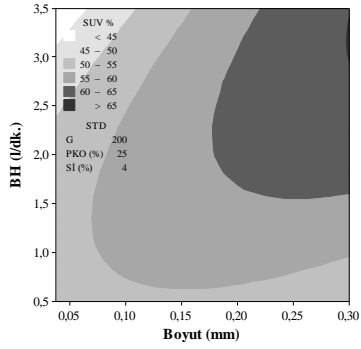




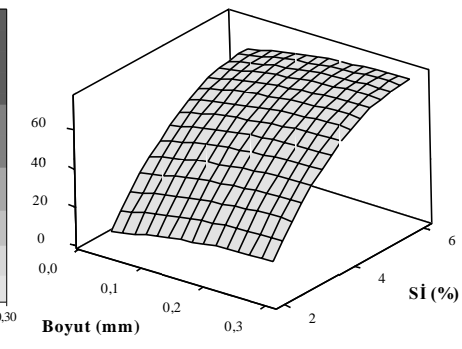
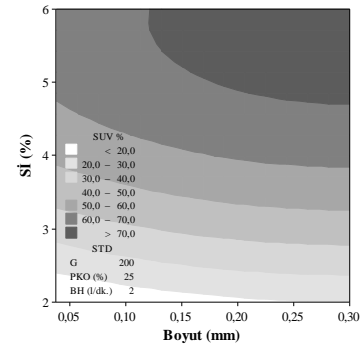
(f)



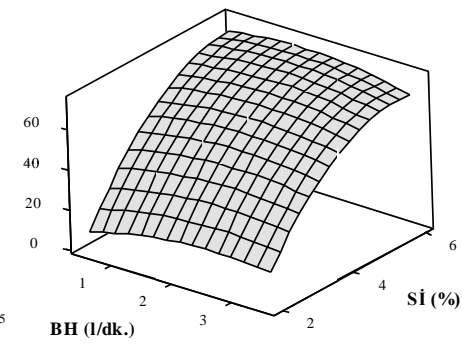
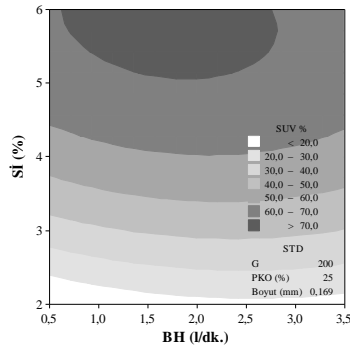
(g)



(h)



(i)



(j)

Şekil 4.56 : Kükürt uzaklaştırma oranı için yanı yüzey ve kontur grafikleri (devam).

Şekil 4.56 (d)'de, PKO % 25, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulduğu koşullarda, G ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafikler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin durağan sırt yapısında olması durağan noktanın deney bölgesi içinde olmadığını ve kükürt uzaklaştırma oranındaki değişimlerin G değerinden bağımsız olarak kükürt içeriğine bağlı olduğunu göstermektedir. Kontur grafiğinden, en yüksek kükürt uzaklaştırma oranı değerlerine % 5'ten fazla kükürt içeriklerinde ulaşılabildiği görülmektedir.

Şekil 4.56 (e)'de sabit G (200), besleme hızı (2 litre/dakika) ve kükürt içeriğinde (% 4) PKO ve tane boyutunun fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden kükürt uzaklaştırma oranına olan etkiler görülmektedir. Yanıt yüzeyi grafiğinin dairesel yapısı PKO ve tane boyutu arasındaki iç etkileşimin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Kontur grafiği 150 mikron üzerinde % 35 PKO değerine kadar % 60 kükürt uzaklaştırma verimlerine ulaşılabileceğini göstermektedir.

Sabit G değeri (200), tane boyutu (-0,150 mm) ve kükürt içeriğinde (% 4), PKO ve besleme hızının fonksiyonu olarak çizilen eğrilerden PKO ve besleme hızının kükürt uzaklaştırma oranına etkileri görülmektedir (Şekil 4.56 (f)). Yanıt yüzeyi grafiğinin eliptik yapısı, maksimum noktanın deneysel bölge içinde olduğunu ve PKO ile besleme hızı arasındaki iç etkileşimin kükürt uzaklaştırma oranı için önemli olduğunu göstermektedir. Durağan noktadan uzaklaşma veriminde düşüşe sebep olur. Kontur grafiğinden, % 60'tan büyük kükürt uzaklaştırma verimleri için 1,5-2,5 litre/dakika besleme hızlarında % 20'den düşük PKO'larda çalışmak gerektiği görülmektedir.

PKO ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen grafiklerde (Şekil 4.56 (g)), G değeri 200, tane boyutu -0,150 mm ve besleme hızı 2 litre/dakika olarak sabit tutulmuştur. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde düşük kükürt içeriklerinde PKO'nun etkisinin olmadığı, kükürt içeriğinin yükselmesi ile PKO'nun önem kazandığı görülmektedir. Kontur grafiğinden ise yüksek kükürt uzaklaştırma verimleri (> %70) % 35'ten küçük PKO'larda % 5'ten yüksek kükürt içeriklerinde elde edilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.56 (h)'de görülen grafikler, tane boyutu ve besleme hızının fonksiyonu olarak, G 200, PKO % 25 ve kükürt içeriği % 4 olarak sabit tutulduğu koşullarda

çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin artan sırt yapısında olması durağan noktanın deneysel bölge içinde olmadığını ifade eder. Yanıt yüzeyi grafiği incelendiğinde besleme hızının daha etkin olduğu görülmektedir. En yüksek kükürt uzaklaştırma verimleri 1,5 litre/dakikadan yüksek besleme hızlarında 150 mikrondan büyük tane boyutlarında elde edilebilmektedir.

Şekil 4.56 (i)'de sabit G değeri (200), PKO (% 25) ve besleme hızında (2 litre/dakika), tane boyutu ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak çizilen eğrilerde de yanıt yüzey grafiği dantan sırt yapısındadır ve tane boyutunun yüksek kül içeriklerine kadar etkin olmadığı görülmektedir. Kontur grafiğinden görüldüğü gibi % 70'ten fazla kükürt uzaklaştırma verimleri 106 mikrondan büyük tane boyutlarında % 5'ten fazla kükürt içeriklerinde elde edilebilir.

Şekil 4.51 (j)'de görülen grafikler, besleme hızı ve kükürt içeriğinin fonksiyonu olarak G 200, PKO % 25 ve tane boyutu -0,150 mm'de sabit tutularak çizilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiği artan sırt yapısındadır ve yanabilir verim kükürt içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek kükürt içeriklerinde besleme hızının etkisi görülmektedir. En yüksek kükürt uzaklaştırma verimleri 0,5-2,75 litre/dakika besleme hızlarında % 5'in üzerindeki kükürt içeriklerinde ulaşılabilir.

#### **4.2.3.4 Ayırma etkinliği yönünden inceleme**

Yapılan zenginleştirme işlemleri ayırma etkinliği yönünden de incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre hesaplanan ayırma etkinliği değerleri Çizelge 4.37'te verilmiştir.

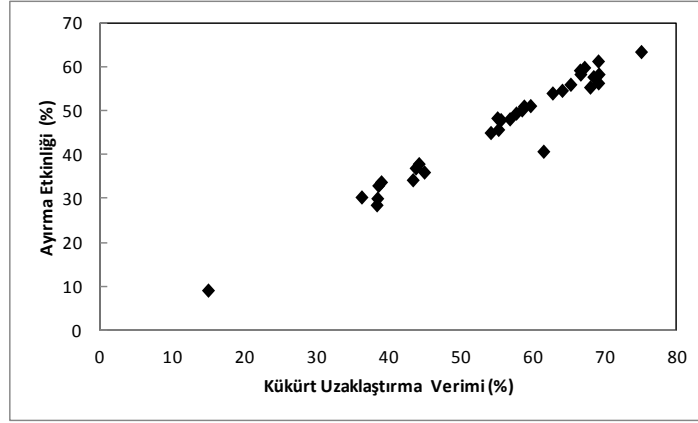
Çizelge 4.37'den ve Şekil 4.57'den de görüldüğü gibi kükürt uzaklaştırma oranı arttıkça ayırma etkinliğide artmaktadır. Bunun sebebi, ayrılması istenilen kükürtün başarılı bir şekilde ayrılmasıdır. Şekil 4.58'de tüvenan kükürt içeriğine bağlı olarak ayırma etkinliğinin değişimi görülmektedir. Tüvenandaki kükürt içeriğinin artışı ayırma etkinliğini artırmaktadır.

Elde edilen uzaklaştırma verimleri ve dolayısı ile ayırma verimleri % 70'lere çıkmaktadır. Her ne kadar bu değerler başarılı bir kükürt ayırmayı işaret etse de, bu değerlendirme deneylerde kullanılan kömürün bünyesinde bulunan ve gravite yöntemleri ile ayrılma imkanı olmayan % 2'lik organik kükürt varlığı hesaplara katılarak yapılmıştır. Gerek kükürt uzaklaştırma oranı gerekse ayırma etkinliğinin, gravite yöntemleri ile ayrılabilceği varsayılan piritik kükürt miktarı üzerinden

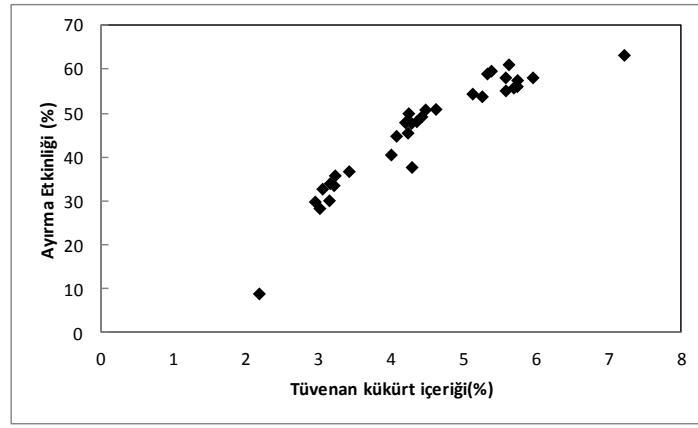
yapıldığı takdirde %100'ler mertebesinde olacağı tahmin edilmektedir. Bu olgu, deney sonunda alınan ürünlerin gözlemlenmesi ile de doğrulanmıştır.

**Çizelge 4.37 :** Yüksek kükürlü kömür zenginleştirme için ayırma etkinliği değerleri.

Tüvenan Kükürt (%)	Konsantre		Artık		Ayırma Verimi (%)	Kükürt Uzaklaştırma Oranı (%)	Ayırma Etkinliği (%)
	Miktar (%)	Kükürt (%)	Miktar (%)	Kükürt (%)			
3,21	93,4	2,09	6,6	18,93	94,46	39,06	33,51
5,38	89,1	1,97	10,9	33,15	92,29	67,29	59,58
3,14	92,8	2,16	7,2	15,87	93,75	36,33	30,08
3,15	89,5	1,99	10,5	13,02	90,55	43,45	34,00
5,12	87,4	2,10	12,6	26,06	90,17	64,19	54,37
3,05	93,1	2,01	6,9	17,00	94,06	38,66	32,72
3,22	89,6	1,98	10,4	13,92	90,72	45,04	35,76
5,62	88,4	1,96	11,6	33,52	91,83	69,21	61,03
4,42	89,2	2,09	10,8	23,65	91,37	57,81	49,18
4,28	90,0	2,11	10,0	23,75	92,02	55,67	47,69
3,42	91,6	2,09	8,4	17,84	92,86	43,86	36,71
2,18	93,7	1,97	6,3	5,17	93,87	15,01	8,88
2,95	90,4	2,00	9,6	11,82	91,27	38,53	29,80
4,07	88,7	2,10	11,3	19,48	90,48	54,27	44,75
3,01	89,0	2,08	11,0	10,53	89,86	38,44	28,30
4,47	89,6	2,05	10,4	25,31	91,87	58,90	50,76
4,19	88,9	2,03	11,1	21,57	90,94	56,92	47,87
5,73	83,6	2,11	16,4	24,24	86,84	69,23	56,07
4,24	89,2	1,97	10,8	22,97	91,30	58,61	49,91
5,32	89,1	1,99	10,9	32,66	92,27	66,68	58,95
5,95	85,3	2,14	14,7	28,08	88,77	69,29	58,06
5,74	85,6	2,11	14,4	27,35	88,91	68,55	57,46
4,23	88,2	2,14	11,8	19,84	90,13	55,34	45,47
4,28	91,8	2,60	8,2	23,03	93,38	44,29	37,66
5,58	88,1	2,10	11,9	31,22	91,32	66,75	58,07
4,35	90,8	2,15	9,2	26,06	92,88	55,20	48,08
5,69	87,2	2,26	12,8	29,05	90,37	65,37	55,74
5,25	88,1	2,21	11,9	27,67	90,89	62,87	53,76
4,61	88,7	2,09	11,3	24,49	91,09	59,79	50,88
5,58	83,9	2,12	16,1	23,65	87,01	68,09	55,10
4,00	77,3	1,99	22,7	10,83	78,89	61,60	40,49
7,21	83,4	2,15	16,6	32,75	88,00	75,18	63,18



Şekil 4.57 : Kükürt uzaklaştırma oranı ve ayırma etkinliği grafiği.



Şekil 4.58 : Tüvenan kükürt içeriği ve ayırma etkinliği grafiği

#### 4.2.4 Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirmenin optimizasyonu

##### 4.2.4.1 Yanıt yüzeyi ve kontür grafikleri ile optimizasyon

Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılacak optimizasyon için tüm bağımsız değişkenler için çizilen grafiklerden ayırma şartları tespit edilmiş (Çizelge A.45). Her bir model için çalışma aralıkları belirlenmiş ve Çizelge 4.38’de verilmiştir. Her bir model için aşağıdaki bağımsız değişkenlerin gerçek değerleri için yanıt değişkenlerin alacağı değerler hesaplanmış ve Çizelge 4.39’de verilmiştir.

Çizelge 4.38 : Yanıt yüzeyi ve kontür grafiklerini kullanarak yapılan optimizasyon.

Kombinasyon	Bağımsız Değişkenler				
	G	PKO (%)	Boyut (µm)	BH (l/dk.)	Sİ (%)
YV	100-300	30-40	38-106	2,5-3,5	2-3
AV	250-300	30-35	38-106	2,0-3,5	2-3
SUO	275-300	5-20	150-300	1,5-2,5	5-6

**Çizelge 4.39 :** Yanıt yüzeyi ve kontur grafiklerini kullanarak bulunan optimizasyon değerleri için hesaplanan yanıt değişken değerleri.

	YV				AE				SUO			
G	100	100	300	300	250	250	300	<b>300</b>	275	275	300	300
PKO	30	40	30	40	30	35	30	<b>35</b>	5	20	5	20
Boyut	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	<b>0,038</b>	0,15	0,15	0,15	0,15
BH	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	<b>2,0</b>	1,5	1,5	1,5	1,5
Sİ	3	3	3	3	3	3	3	<b>3</b>	6	6	6	6
YV	98,3	98,4	98,2	98,4	97,8	98,2	98,1	<b>98,5</b>	82,4	90,6	82,6	90,8
AE	95,9	95,7	98,4	98,6	97,1	97,6	98,4	<b>98,9</b>	78,8	87,1	79,1	87,5
SUO	30,0	30,0	40,0	35,9	37,0	35,5	<b>42,3</b>	<b>40,3</b>	<b>82,3</b>	<b>77,5</b>	<b>85,4</b>	<b>79,8</b>

Çizelge 4.39'dan da görülebileceği gibi kükürt uzaklaştırma oranı arttıkça yanabilir verim ve ayırma verimi düşmektedir. Bu sebepten dolayı optimizasyon yanabilir verim ve ayırma veriminin yüksek tutulduğu değerler için yapılmıştır. Sonuç olarak yüksek kükürlü kömür zenginleştirilmesi için belirlenen optimum koşullar % 3 kükürt içeriğinde, G değerinin 300, PKO'nun % 35, tane boyutunun 0,038 mm ve besleme hızının 2 litre/dakika olduğu koşullar olarak bulunmuştur.

#### 4.2.4.2 Çekicilik fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon

Yanıt değişkenlerini belirleyecek olan bağımsız değişkenlerin minimum, maksimum ve hedef değerleri verilmiştir. Yanıt değişkenlerinin aldığı değerler Çizelge 4.40'da, çekicilik fonksiyonu ile yapılan optimizasyon sonuçları ise Çizelge 4.41'de verilmiştir. Önem derecesi her yanıt değişkeni için 1 olarak alınmıştır.

Sonuç olarak, yüksek kükürt içeren kömürlerin zenginleştirilmesi için çekicilik fonksiyonu kullanılarak yapılan çalışmalarda optimum koşullar, G değeri 300, PKO % 38 tane boyutu 44 mikron ve besleme hızı 0,5 litre/dakika, kükürt içeriği %4 olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.40 :** Yanıt değişkenlerinin değerleri.

Yanıt değişkenleri	Düşük	Hedef	Yüksek	Önem
YV (%)	95	97	99	1
AV (%)	95	97	99	1
SUO (%)	50	60	75	1

**Çizelge 4.41 :** Yüksek kükürlü kömür zenginleştirme için çekicilik fonksiyonu ile yanıt değişkenlerin optimizasyonu.

	G	PKO (%)	Boyut (mm)	BH (l/dk .)	Sİ (%)	YV (%)	Çekicilik	TKV (%)	Çekicilik	KUO (%)	Çekicilik	ID (kcal/kg)
YÇ	300	38	0,043	0,5	4,18	97,4	0,819	96,9	0,958	60,0	1,000	0,922
YÇ	300	45	0,062	2,3	3,86	96,0	0,483	95,2	0,096	50,3	0,034	0,116
YÇ	100	31	0,300	3,5	2,80	95,2	0,081	95,3	0,165	54,0	0,404	0,175
YÇ	300	45	0,038	0,5	4,07	97,0	0,999	97,0	0,999	54,6	0,462	0,773
YÇ	100	34	0,300	3,5	2,60	95,0	0,001	95,2	0,078	50,1	0,012	0,008
YÇ	300	39	0,041	0,5	4,21	97,4	0,801	97,0	0,983	60,0	0,997	0,922
YÇ	298	45	0,038	0,5	4,13	97,0	1,000	96,9	0,927	55,4	0,538	0,793
YÇ	100	34	0,300	3,5	2,60	95,0	0,005	95,2	0,082	50,2	0,017	0,019
YÇ	300	43	0,062	2,8	4,03	96,2	0,578	95,1	0,028	51,0	0,096	0,116
YÇ	300	45	0,038	0,5	4,18	96,9	0,962	96,8	0,884	56,1	0,606	0,802
YÇ	300	45	0,038	0,5	4,11	97,0	1,000	96,9	0,965	55,2	0,519	0,794
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,74	95,0	1,000	95,1	0,965	50,5	0,519	0,019
YÇ	100	32	0,300	3,2	2,72	95,0	0,007	95,3	0,166	51,9	0,193	0,059
YÇ	300	21	0,038	3,5	4,06	95,5	0,242	95,3	0,162	51,8	0,182	0,192
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,74	95,0	0,001	95,1	0,048	50,5	0,053	0,014
YÇ	300	21	0,038	3,1	3,80	95,3	0,138	95,1	0,074	52,3	0,233	0,134
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,74	95,0	0,001	95,1	0,047	50,5	0,053	0,013
YÇ	300	21	0,038	3,5	3,98	95,5	0,245	95,4	0,188	50,9	0,087	0,159
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,73	95,0	0,003	95,1	0,049	50,3	0,029	0,015
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,74	95,0	0,001	95,1	0,047	50,5	0,053	0,013
YÇ	100	26	0,286	3,5	2,74	95,0	0,002	95,1	0,048	50,5	0,053	0,018
<b>GÇ</b>	<b>300</b>	<b>38</b>	<b>0,043</b>	<b>0,5</b>	<b>4,18</b>	<b>97,4</b>	<b>0,819</b>	<b>96,9</b>	<b>0,958</b>	<b>60,0</b>	<b>1,000</b>	<b>0,922</b>

YÇ: Yerel çözüm

GÇ: genel çözüm





## 5. SONUÇLAR

1.) Kil zenginleştirme deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak  $d_{90}$  boyutu ve KDK için aşağıdaki kodlu model denklemler geliştirilmiştir.

$d_{90}$  boyutu için:

$$\begin{aligned} Y_{d_{90}} = & 7,50886 - 0,39065X_1 + 0,70085X_2 + 0,29535X_3 + 0,10898X_4 \\ & + 0,15624X_1^2 + 0,40649X_2^2 - 0,11864X_3^2 - 0,10676X_4^2 + 0,10297X_1X_2 - \\ & 0,02691X_1X_3 - 0,10609X_1X_4 - 0,02091X_2X_3 + 0,08166X_2X_4 \\ & + 0,06866X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.1)$$

KDK için:

$$\begin{aligned} Y_{KDK} = & 93,0707 + 1,8682X_1 - 2,0380X_2 - 0,4529X_3 - 0,6793X_4 + 0,4812X_1^2 - \\ & 2,9155X_2^2 + 0,2264X_3^2 - 0,4529X_4^2 + 0,9341X_1X_2 - 0,8492X_1X_3 \\ & + 0,0000X_1X_4 - 0,9341X_2X_3 - 2,2928X_2X_4 - 0,8492X_3X_4 \end{aligned} \quad (5.2)$$

2.) Model denklemlerle elde edilen tahmini  $d_{90}$  ve KDK değerleri ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları,  $d_{90}$  boyutu için, F değeri 3,14, Prob>F değeri 0,016,  $R^2$  0,73, korelasyon katsayısı 0,856, KDK için, F değeri 5,05, Prob>F değeri 0,001,  $R^2$  0,82, korelasyon katsayısı 0,903 olarak bulunmuştur. Yapılan kalıntı testleri de modellerde herhangi bir hata olmadığını göstermiştir.

3.) Kil zenginleştirme deneylerinde model optimizasyon sonuçları, yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri, kritik nokta hesabı, örtüşen grafikler ve çekicilik fonksiyonuna göre aşağıda verilmiştir (Çizelge 5.1).

4.) Kil zenginleştirme deneylerinde, düşük G (20) ve yüksek PKO (10) şartlarında yapılan deneyler haricinde, ideal ayırım gerçekleşmiş ve 160, 230 ve 300 G değerlerinde elde edilen ürünlerin ayırma boyutları ( $d_{50}$ ) ortalama 14 mikron olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 5.1 : Kil zenginleştirme için optimum koşullar.**

	YY Grafik	Kritik nokta		Örtüşen grafik	Çekicilik fonksiyonu
G	300	270	130	300	300
PKO(%)	6	4,0	3,9	6	5,9
BH (l/dk.)	0,5	4,1	3,6	1,0	1,0
BM	3,5	1,8	3,0	3,0	2,7
d <sub>90</sub>	5,0	7,0	7,6	5,9	6
KDK	107	94	93	104	105

5. ) Yüksek PKO'larda çökme işleminin gerçekleşebilmesi için yüksek G değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek G değerleri ile yüksek PKO'nun getirdiği viskozite engeli aşılmış olmakta ve 250 G değeri üzerinde çalışıldığında %8 PKO'lara kadar iyi bir ayırma mümkün olmaktadır. Ancak G değeri 150'nin altında, %4 gibi düşük PKO'lara inilmesi ve ayırmanın bu şartlarda yapılması gerekmektedir.

6.) Falcon ayırıcısının, mineraller arası özgül ağırlık farkı varsa, özgül ağırlığa göre, yoksa boyuta göre ayırma yaptığı, aynı yoğunluklardaki minerallerin ayrılmasında, bir boyuta göre ayırma cihazı gibi çalıştığı yapılan deneylerle anlaşılmıştır.

7.) Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak ısı değer, yanabilir verim, temiz kömür verimi, kül uzaklaştırma oranı için aşağıdaki kodlu model denklemler geliştirilmiştir.

Isıl değer için:

$$\begin{aligned} Y_{ID} = & 5115,41 - 24,21X_1 - 62,57X_2 + 53,21X_3 - 15,32X_4 - 538,32X_5 - 29,58X_1^2 \\ & + 17,29X_2^2 - 0,67X_3^2 + 13,42X_4^2 - 49,71X_5^2 + 0,81X_1X_2 - 14,31X_1X_3 \\ & + 34,56X_1X_4 - 2,81X_1X_5 - 26,62X_2X_3 + 63,06X_2X_4 - 101,06X_2X_5 \\ & - 14,85X_3X_4 - 6,44X_3X_5 - 15,31X_4X_5 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Yanabilir verim için:

$$\begin{aligned} Y_{YV1} = & 92,9073 + 0,1859X_1 + 2,5195X_2 - 0,4474X_3 + 0,5403X_4 - 2,0248X_5 \\ & + 0,0379X_1^2 - 1,1522X_2^2 + 0,1460X_3^2 + 0,0368X_4^2 - 0,0736X_5^2 \\ & + 0,0241X_1X_2 + 0,0262X_1X_3 + 0,4681X_1X_4 + 0,0374X_1X_5 - \\ & 0,2486X_2X_3 - 0,0606X_2X_4 + 0,2123X_2X_5 + 0,0110X_3X_4 - 0,9587X_3X_5 \\ & + 0,1710X_4X_5 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Temiz kömür verimi için:

$$\begin{aligned}
 Y_{TKV} = & 84,7990 + 0,2613X_1 + 2,9510X_2 - 0,7245X_3 + 0,9148X_4 - 4,8845X_5 - \\
 & 0,0512X_1^2 - 1,1549X_2^2 + 0,5910X_3^2 - 0,0630X_4^2 + 0,2770X_5^2 - 0,0296X_1X_2 \\
 & + 0,0702X_1X_3 + 0,3387X_1X_4 + 0,1492X_1X_5 - 0,0671X_2X_3 - \\
 & 0,2224X_2X_4 + 0,8482X_2X_5 - 0,0704X_3X_4 - 1,0961X_3X_5 + 0,4728X_4X_5
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Kül uzaklaştırma oranı için:

$$\begin{aligned}
 Y_{KUO} = & 31,9107 - 0,1556X_1 - 3,6458X_2 + 1,7561X_3 - 1,6537X_4 + 4,0824X_5 + \\
 & 0,3589X_1^2 + 1,8439X_2^2 - 0,9442X_3^2 + 0,6864X_4^2 - 1,2648X_5^2 - 0,0100X_1X_2 - \\
 & 0,4033X_1X_3 + 0,2454X_1X_4 - 0,6356X_1X_5 - 0,2027X_2X_3 + 0,6348X_2X_4 - \\
 & 2,2550X_2X_5 + 0,3502X_3X_4 + 0,5566X_3X_5 - 0,8541X_4X_5
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

8.) Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesine ait model denklemlerle elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 5.2).

**Çizelge 5.2 :** Yüksek küllü kömür zenginleştirme model analiz sonuçları.

Model	F	Prob>F	R <sup>2</sup>	Korelasyon
ID	39,23	<0,001	0,9862	0,993
YV	14,13	<0,001	0,9625	0,981
TKV	23,07	<0,001	0,9767	0,988
KUO	5,01	0,004	0,9027	0,950

Yapılan kalıntı testleri de modellerde herhangi bir hata olmadığını göstermiştir.

9.) Yüksek kül içeren kömürün zenginleştirilmesi deneyleri modellerinin optimizasyonu, yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ve ve çekicilik fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 5.3 :** Yüksek küllü kömür zenginleştirme için optimum koşullar.

	YY Grafik		Çekicilik fonksiyonu
G	100	300	167
PKO	10	30	43
Boyut	0,3	0,106	0,231
BH	0,5	3,5	0,9
Kİ	10	10	10
YV	96,5	98,9	98,01
TKV	97,0	95,7	96,83
KUO	24,6	26,4	25,04
ID	6421	6203	6222

10.) Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilmesi deneylerinde yanıt yüzeyi yöntemi kullanılarak yanabilir verim, ayırma verimi, kükürt uzaklaştırma oranı için aşağıdaki kodlu model denklemler geliştirilmiştir.

Yanabilir verim için:

$$\begin{aligned}
 Y_{YV2} = & 93,3267 + 0,1259X_1 + 2,0664X_2 - 0,4977X_3 + 0,2886X_4 - 0,7579X_5 \\
 & + 0,0875X_1^2 - 1,2163X_2^2 + 0,3532X_3^2 + 0,0413X_4^2 + 0,0259X_5^2 \\
 & + 0,0201X_1X_2 + 0,0859X_1X_3 - 0,0879X_1X_4 - 0,0628X_1X_5 - \\
 & 0,3361X_2X_3 - 0,1647X_2X_4 + 0,0597X_2X_5 - 0,0574X_3X_4 + 0,0636X_3X_5 - \\
 & 0,0042X_4X_5
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Ayırma verimi için :

$$\begin{aligned}
 Y_{AV} = & 91,1638 + 0,1236X_1 + 2,1106X_2 - 0,3174X_3 + 0,3047X_4 - 1,4341X_5 \\
 & + 0,2047X_1^2 - 1,2454X_2^2 + 0,4215X_3^2 + 0,0516X_4^2 + 0,0173X_5^2 \\
 & + 0,0879X_1X_2 - 0,2216X_1X_3 - 0,0633X_1X_4 - 0,0770X_1X_5 - \\
 & 0,2663X_2X_3 - 0,3872X_2X_4 - 0,0951X_2X_5 - 0,0838X_3X_4 \\
 & + 0,1173X_3X_5 + 0,1545X_4X_5
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Kükürt uzaklaştırma verimi için:

$$\begin{aligned}
 Y_{SUO} = & 59,5915 + 0,6913X_1 - 1,4791X_2 + 2,6131X_3 + 0,4247X_4 + 13,7953X_5 \\
 & + 0,8571X_1^2 - 0,4287X_2^2 - 0,6472X_3^2 - 1,1525X_4^2 - 3,7555X_5^2 - 1,0214X_1X_2 \\
 & - 1,2452X_1X_3 - 0,3806X_1X_4 - 0,0801X_1X_5 + 0,1776X_2X_3 \\
 & + 0,2401X_2X_4 - 0,5264X_2X_5 + 1,6058X_3X_4 - 0,0495X_3X_5 - 0,6852X_4X_5
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

11.) Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilmesine ait model denklemlerle elde edilen tahmini değerler ile deneysel değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçları aşağıda verilmiştir (Çizelge 5.4).

**Çizelge 5.4 :** Yüksek kükürtlü kömür zenginleştirme model analiz sonuçları.

Model	F	Prob>F	R <sup>2</sup>	Korelasyon
YV2	3,75	0,014	0,8722	0,934
AE	4,95	0,005	0,90	0,95
SUO	9,41	<0,001	0,9448	0,972

Yapılan kalıntı testleri de modellerde herhangi bir hata olmadığını göstermiştir.

12.) Yüksek kükürt içeren kömürün zenginleştirilmesi deneyleri modellerinin optimizasyonu, yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri ve çekicilik fonksiyonu kullanılarak yapılmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

**Çizelge 5.5 :** Yüksek kükürtlü kömür zenginleştirme için optimum koşullar.

	YY Grafik	Çekicilik fonksiyonu
G	<b>300</b>	300
PKO	<b>35</b>	38
Boyut	<b>0,038</b>	0,043
BH	<b>2,0</b>	0,5
Sİ	<b>3</b>	4,18
YV	<b>98,5</b>	97,4
TKV	<b>98,9</b>	96,9
KUO	<b>40,3</b>	60

13.) Numune sentetik olarak hazırlandığı için G değerinin etkisi tam olarak görülmemektedir. Eğer kömürün içinde ara yoğunluklarda (1,3-2,5 g/cm<sup>3</sup> arası) malzeme bulunsaydı, bunların getireceği farklı engelli çöküş etkisi ile G değerinin etkisi daha belirgin bir şekilde görülebilecekti.



## KAYNAKLAR

- Abdel-Khalekh, M.A., Chen, Z., Wiseman, J., Grulke, E., Hepworth, M.T., Haeberlin, O.,** 2000. *An innovative integrated approach to minimizing gypsum and pyrite wastes by conversion to marketable products*, U.S. Contract No. DE-FG26-98FT40114-01.
- Abela, R.L.,** 1997. Centrifugal concentrators in gold recovery and coal processing, *Extraction Metallurgy Africa 1997*, Johannesburg, June 25 - 26.
- Aldemir, A.,** 2008. Polianilin'in enzimatik olarak sentezlenmesi ve reaksiyon koşullarının optimize edilmesi, *Doktora Tezi*, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı.
- Alp İ., Celep O., Deveci H.,** 2005. Application of Falcon Centrifugal Concentrator For Recovery of Gold from Mastra Ore, *XI<sup>th</sup> Balkan Mineral Processing Congress: Mineral Processing in Sustainable Development*, 22-26 May, Tirana, Albania, 314-320.
- Alp, I., Celep, O., Deveci, H., Yazıcı, E.,** 2004. Processing of Gold From Mastra (Gümüşhane-Turkey) Ore by Knelson Gravity Concentrator , *SGEM 2004*, Albena, Bulgaria, 259-266.
- Ancia, P., Frenay, J., and Dandois, P.,** 1997. Comparison of Knelson and Falcon centrifugal separators, *Innovation in Physical Separation Technologies*, Falmouth, UK: IMM, 53-62.
- Antony, J.,** 2003. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0750647094.
- Aslan, N.,** 2007a. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modelling the influence of some operating variables of a Multi Gravity Separator for cleaning, *Fuel*, **86**, 769-776.
- Aslan, N.,** 2007b. Modelling and optimization of Multi Gravity Separator to produce celestite concentrate, *Powder Technology*, **174**, 127-133.
- Aslan, N., Cebeci, Y.,** 2007. Application of Box-Henken design and response surface methodology for modelling of some Turkish coals, *Fuel*, **86**, 90-97.
- Aslan, N.,** 2008a. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration, *Powder Technology*, **185**, 80-86.
- Ateşok, G.,** 2009. *Kömür Hazırlama ve Teknolojisi*, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları, İstanbul.

- Ateşok, G., Dinçer, H., Bulut, G., Tarkan, M., Kangal, O.,** 2003. The Upgrading of Bitlis-Turkey Disthenes by Gravity Methodes, *Mineral Processing in the 21th Century, Proceeding of X-Balkan Mineral Processing Congress*, Varna, Bulgaria, 579-583.
- Banisi, S.,** 1990. An Investigation of the Behaviour of Gold in Grinding Circuits, *Masters Thesis*, Mining and Metallurgical Engineering, Department McGill University, Montreal, Canada.
- Bektaş, İ.,** 2006. Antep fıstığı kabuklarının sıvılaştırılması ve elde edilen ürünlerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Bhaskar U.K., Govindarajan, B., Barnwal, J. P., Venugopal, R., Jakhu, M. R., Rao, T. C.,** 2002. Performance and modeling studies of an MGS for graphite rejection in a lead concentrate, *International Journal of Mineral Processing*, **67**, Issues 1-4, 59-70.
- Box, G.E.P., Hunter, J.S. and Hunter, W.G.,** 2005. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery*, John Wiley & Sons, New Jersey
- Box, G.E.P., Hunter, W.G. and Hunter, J.S.,** 1978. *Statistics for Experiments*, John Wiley and Sons, New York, 291-334.
- Boylu, F.,** 2011. Optimization of foundry sand characteristics of soda-activated calcium bentonite, *Applied Clay Science*, **52**, 1-2, 104-108.
- Burt, R. O.,** 1992. Gravity Concentration of Ultrafines-A Literature Review of Centrifugal Concentrating Devices, MDA Report.
- Burt, R. O.,** 1997. Gravity concentration-still a ‘Modern’ process, *Physical Separation Technologies*, Falmouth, UK: IMM, 147-158.
- Burt, R. O., Korinek, G., Young, S. R., Deveau, C,** 1995. Ultrafine tantalum recovery strategies, *Minerals Eng.*, **8**(8), 859-870.
- Burt, R.,** 1999. The role of gravity concentration in modern processing plants. *Miner. Eng.*, **12** (11), 1291-1300.
- Caceres, G., Joly, P., Goffaux, D., Frenay, J.,** 1996. Application of the Knelson Concentrator to Small Scale Mining in the Atacama Region, Chile, *CleanTechnology for the Mining Industry*, Ed. Sanchez, M., Vergara, F., Castro, S., University of Concepcion, Chile
- Chan, B. S. K., Mozley, R. H., and Childs, G. C. J.,** 1989. The multi-gravity separator (MGS)—a mine scale machine, In *Mineral Process in the United Kingdom*, London: IMM, 107-123.
- Chan, B. S. K., Mozley, R. H., and Childs, G. J. C.,** 1991a. Extended trials with the high tonnage Multi-Gravity Separator, *Miner. Eng.*, **4**(3-4), 489-496.
- Chan, S.K., Mozley, R.H., Childs, G.J.C.,** 1991b. The Multi-Gravity Separator (MGS) - A Mine Scale Machine. Richard Mozley Limited, Redruth, Cornwall, UK, 20
- Chen, L., Ren, N., Xiong, D.,** 2008. Experimental study on performance of a continuous centrifugal concentrator in reconcentrating fine hematite, *Int. J. Miner. Process.*, **87**, 9-16



- Clemente, D., Newling, P., Betalho de Sousa, A., Lejeune, G., Barber, S.P., Tucker, P.,** 1993. Reprocessing slimes tailings from a tungsten mine. *Minerals Engineering*, **6**, 831- 839.
- Collins, C. A., Seeney, F. M.,** 1999. *Statistical experiment design and interpretation: an introduction with agricultural examples*, Wiley ,Chichester.
- Cordingley, M. G.,** 1997. MGS developments and strategies in fine gravity separation techniques, *In Innovation in Physical Separation Technologies*, Falmouth, UK: IMM, 75-82.
- Coulson, J.M., Richardson, J.F.,** 1990. *Particle technology and separation process, Chemical Engineering, 2, 4th edition*, Pegaamon Press, Oxford, New York.
- Coulter, T., Subasinghe, G.K.N.,** 2005. A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators, *Minerals Engineering*, **18**, 9-17
- Çiçek, T., Cöcen, İ.,** 2002. Applicability of Mozley multigravity separator (MGS) to fine chromite tailings of Turkish chromite concentrating plants, *Minerals Engineering*, **15**, Issues 1-2, 91-93
- Çiçek, T.,Cöcen, İ., Birlik, M.,** 2000. Applicability of Multi Gravity Separation to KOP Chromite Concentration Plant, Mineral Processing on the Verge of the 21th Century, *Proceedings of 8th International Mineral Processing symposium*, 87-92, Antalya, Türkiye
- Çiçek, T.,Cöcen, İ., Samanlı, S.,** 1998. Gravimetric Concentration of Fine Chromite Tailings, Innovations in Mineral and Coal Processig, *Proceedings of 7th International Mineral Processing symposium*, 731-736, İstanbul, Türkiye
- Çilingir, Y., Sen, Ş., Seyrankaya, A., Güler, E.,** 2000. Enrichment of fine specular hematite tailings by mozley multi-gravity separator for use in the paint industry, Mineral Processing on the Verge of the 21th Century, *Proceedings of 8th International Mineral Processing Symposium*, 93-96, Antalya, Türkiye
- Çinku, K.,** 2008. Aktivasyon Yöntemleri İle Bentonitten Su Bazlı Kıvamlaştırıcı Üretiminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstütüsü
- Dean, A., Voss, D.,** 1999. *Design and Analysis of Experiments*, Springer-Verlag, New York
- Demir, I., Ruch, R.R., Lytle, J.M., Steele, J.D., Rohl, C.C.,** 1999. Assessing the Removal of Air Toxics in Marketed Illinois Coals by Gravity-Based Cleaning, *Environmental Geology*, **152**, Illinois State Geological Survey.
- El-Midany, A.A., Ibrahim, S.S.,** 2011. Does calcite content affect its separation from celestite by Falcon concentrator?, *Powder Technology*, **213**, Issues 1-3, 10, 41-47
- Ergün, L., Ersayin, S.,** 2002a. Studies on pinched sluice concentration: Part I: The effects of operating variables and sluice geometry on the performance of pinched sluices. *Miner. Eng.*, **15** (6), 423-435.

- Falcon Concentrators Inc.**, 1997. Falcon Model SB: A new generation in gravity gold recovery.
- Froehling, M., Mohns, C., Rajwani, R., Fullam, M.**, 2007. Reduction of Free Gold Losses in the Cleaner Circuit with the Installation of a Gravity Circuit at the Kemess Mine, *39<sup>th</sup> Canadian Mineral Processors Conference*, Final Technical and Social Program, Ottawa, Canada
- Gee, B., Holtham, P., Dunne, R., Gregory, S.**, 2005. Recovery of Fine Gold Particles Using a Falcon 'B' Separator, *International Symposium for the Treatment of Gold Ores*, Calgary, Kanada.
- Gence, N.**, 2001. Enrichment of Chromite Ores by Shaking Table and Multi Gravity Separator, *IX. Balkan Mineral Processing Congress*, New Developments in Mineral Processing, Eds. G. Önal, S. Atak, A. Güney, M.S. Çelik, A.E., Yüce, İstanbul, Turkey, 111-114.
- Gillis, A.**, 2011. Kişisel görüşmeler.
- Gray, S., Abols, J., McCallum, A., Patrick, Johansen, G., G.**, 2003. CIP - Who needs it? A combination circuit of gravity, flotation and intensive leach may provide the optimal environmental end cost outcome for gold plants, *Canadian Mineral Processor's Conference*, Vancouver.
- Grim, R. E.**, 1968. *Clay Mineralogy, 2nd ed.*, McGraw-Hill, New York.
- Grim, R. E., Güven, N.**, 1978. *Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and Uses*, Elsevier, 256s.
- Güvenç, A.**, 2004. Oleyil Oleatın Süperkritik CO<sub>2</sub> ortamında Enzimatik üretimi, Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, Ankara, Proje Numarası: 2001-07-05-059
- Honaker, R. Q. ve Das, A.**, 2004. Ultrafine Coal Cleaning Using a Centrifugal Fluidized-Bed , *Coal Preparation*, **24**, 1-2, 1-18
- Honaker, R. Q. and Reed, S.**, 1995. Fine coal circuitry study using flotation and gravity separation. Final Technical Report for ICCI Project Number 94-1/1.1A-1, Fiscal Year 1994, Illinois Clean Coal Institute, Carterville, Illinois.
- Honaker, R. Q.**, 1995. Enhanced gravity separators: new alternatives for fine coal cleaning, *12<sup>th</sup> Int coal pre con*, Intertec Inc., Lexington, Kentucky, 282-92.
- Honaker, R. Q.**, 1998. High capacity fine coal cleaning using an enhanced gravity concentrator, *Mineral Engineering*, 11 (12), 1191-1199.
- Honaker, R. Q., B. C. Paul, D. Wang, and K. Ho.**, 1995. Enhanced gravity separation: An alternative to flotation, *In High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium*, ed. S. K. Kawatra. Littleton, CO: Society of Mining, Metallurgy and Exploration.
- Honaker, R. Q., Govindarajan, B.**, 1998. Enhanced gravity concentration - An effective tool for fine coal cleaning, *Inside Coal Research*, **4**, no. 3, 2-3, Coal Research Center, Southern Illinois University, Carbondale, IL.

- Honaker, R. Q., Patil, D. P.,** 2002. Parametric Evaluation of a Dense-Medium Process Using an Enhanced Gravity Separator, *Coal Preparation*, **22**, 1, 1-18
- Honaker, R. Q., Paul, B. C., Wang, D., and Huang, M.,** 1995. Application of centrifugal washing for fine coal cleaning, *Minerals and Metallurgical Processing*, 80-84.
- Honaker, R. Q., Paul, B.C., Mohanty, M.K., Wang, D.,** 1995. *Advanced Physical Coal Clearing to Comply with Potential Air Toxic Regulations*, Final Technical Report to the Illinois Clean Coal Institute, Carterville, IL
- Honaker, R. Q., Rajan, B.J., Mohanty, M.K., Sing, N.,** 1998. *A Novel High Efficiency Enhanced Gravity Separation Using Dense Medium*, Mid-year Technical Report to the Illinois Clean Coal Institute, Carterville, IL.
- Honaker, R. Q., Singh, N., Govindarajan, B.,** 2000. Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning, *Mineral Engineering*, **13**, 415-427.
- Honaker, R. Q., Wang, D., Ho, K.,** 1996. Application of the Falcon concentrator for fine coal cleaning, *Mineral Engineering*, **9**, 11, 1143-56.
- Honaker, R. Q., Wang, D.,** 1995. *A fine coal circuitry study using column flotation and gravity separation*, Quarterly Technical Report (Sept. 1-Nov. 30, 1994) to the Illinois Clean Coal Institute.
- Honaker, R., Das, A., and Nombe, M.,** 2005. Improving the Separation Efficiency of the Knelson Concentrator using Air Injection, *Coal Preparation*, **25**, 2, 99-116.
- Houseley, K., Apling, A. C., and Chapman, R. J.,** 1997. Effect of particle size and shape on recovery of gold by use of a Knelson concentrator, *In Innovation in Physical Separation Technologies*, Falmouth, UK: IMM, 65-72.
- Huang, L.,** 1996. Upgrading of Gold Gravity Concentrates, A Study of the Knelson Concentrator, *PhD Thesis*, Mining and Metallurgical Engineering Department, McGill University, Montreal, Canada.
- Huang, L., and Mejiab, N.,** 2005. Characterizing Gravity Recoverable PGMS And Gold In Grinding Circuit, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, **29**, B6.
- Kangal, O. ve Güney, A.,** 2001. Comparison of HIWMS and MGS in the Evaluation of Low Grade Feldspar Ores, *IX. Balkan Mineral Processing Congress, New Developments in Mineral Processing*, Eds. G. Önal, S. Atak, A. Güney, M.S. Çelik, A.E., Yüce, İstanbul, Turkey, 331-336.
- Kasapoğlu, Ö. A.,** 2007. Talaşlı İmalatta Bir Kalite Karakteristiğinin Modellenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim Yönetimi Bilim Dalı.
- Kawatra, S. K. ve Eisele, T. C.,** 2001. *Coal Desulfurization: High-efficiency preparation methods*, Taylor & Francis, New York.

- Khuri, A.I., and Cornell, J.A.,** 1987. *Response Surfaces: Design and Analysis*, Marcel, Dekker, New York.
- King, R.P.,** 2001. *Modeling and Simulation of Mineral processing Systems*, Butterworth & Heinemann, Oxford.
- Klima, M. S., Xu, D. D. and Cho, H.,** 1995. A preliminary investigation of dense-medium centrifugation for fine coal separations, *In Proc. XIX International Mineral Processing Congress*, SME Inc., Littleton, Colorado, 139-142
- Knelson, B. and Jones, R.,** 1994. A new Generation of Knelson Concentrators: a Totally Secure System, *Minerals Engineering*, **7**, (2-3), 201-207.
- Knelson, B.,** 1988. Centrifugal Concentration and Separation of Precious Metals, *2<sup>nd</sup> International Conference on Gold Mining*, Vancouver, Kanada, 303-317
- Knelson, B.,** 1992. The Knelson concentrator: Metamorphosis from crude beginning to sophisticated world wide acceptance, *Minerals Engineering*, **5**(10-12), 1091-1097.
- Knelson, B., Edwards, R.,** 1990. Development and economic application of Knelson concentrator in low grade alluvial gold deposits, *The AusIMM Annual Conference*, Rotorua, New Zealand, March 18-21, 123-128.
- Knelson, B., Jones, R.,** 1993. A New Generation of Knelson Concentrators, *Symposium on Environmental Aspects of Mineral Engineering*, Cape Town, South Africa.
- Köroğlu, S. A.,** 2007. Yapay sinir ağlarının gemi yapı problemlerine uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kuehl, R.O.,** 2000. *Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and analysis, 2nd edition*, Duxbury, New York.
- Kul, S.,** 2004. Cevap yüzey yöntemleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimler Enstitüsü Biyoistatistik Anabilim Dalı
- Kwak, J.S.,** 2005. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **45**, 327-334.
- Laplante, A. R., Buonvino, M., Veltmeyer, A., Robitaille, J., and Naud, G.,** 1994. A study of the Falcon concentrator, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **33**(4), 279-288.
- Laplante, A.R.,** 1993. A Comparative Study of Two Centrifugal Concentrators, *24<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, Kanada
- Laplante, A.R.,** 1995. *An Investigation of the Super-Bowl at Mineral Hill and Knelson at Casa Berardi Mines*, Report on the first year of the NSERC-CRD Project 661-148-95, McGill University, Montreal.
- Laplante, A.R., Buonvino, M., Veltmeyer, A., Robitaille, J, Naud, G.,** 1994. A study of the Falcon concentrator, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **33**, Number 4, 279-288.

- Laplante, A.R., Putz, A., Huang, L., Vincent, F.,** 1994. Practical considerations in the operations of gravity gold circuit, *Presented at the Annual Canadian Mineral Processors Conference*, Ottawa.
- Laplante, A.R., Spiller, D. E.,** 2002. Bench-scale & Pilot Plant Testwork For Gravity Concentration Circuit Design, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings*, **1**, 160-175.
- Laplante, A.R., Shu, Y., Marois, J.,** 1996. Experimental characterization of a laboratory centrifugal separator, *Canadian Metallurgical Quarterly*, **35**, No.1, 23-29.
- Lazic, Z.R.,** 2004. *Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- Ling, J.,** 1998. A study of a variable speed 3-in Knelson Concentrator, Doktora Tezi, Department of Mining and Metallurgical Engineering, McGill University, Montreal.
- Ling, J., Laplante, A.R.,** 1997. *The effect of rotating speed on the performance of a centrifugal concentrator, Part 1: separating tungsten from magnetite and silica gangues*, Technical Report, McGill University.
- Lins, F.F., Veiga, M.M., Stewart, J.A., Papalia, A., Papalia, R.,** 1992. Performance of new centrifuge (Falcon) in concentrating a gold ore from Texada Island, B.C., Canada, *Mineral Engineering*, **5**, No. 10-12, 1113-1121.
- Liu, Q., Cui, Z., Etsell, T. H.,** 2006. Pre-concentration and the removal of residual bitumen from oil sands froth treatment tailings using a Falcon centrifugal concentrator, *International Journal of Mineral Processing*, **78**, 4, 220-230.
- Luttrell, G. H., Honaker, R. Q., and Phillips, D. I.,** 1995. Enhanced gravity separators: New alternatives for fine coal cleaning, *12<sup>th</sup> International Coal Preparation Conference*, Lexington, KY, 281-292.
- Lynch, A.J.,** 1997. *Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimisation, Design and Control*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Majumder, A. K., Barnwal, J. P.,** 2006. Modeling of Enhanced Gravity Concentrators-Present Status, *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, **27**, 1, 61-86.
- Majumder, A.K., Barnwal, J.P.,** 2008. New Possibilities in Fine Coal Beneficiation Techniques, *Journal Institution Engineers-Pt MN*, **89**, 3-8.
- Majumder, A.K., Bhoi, K.S., Barnwal, J.P.,** 2007b. Multi-gravity separator: an alternate gravity concentrator to process coal fines, *Mineral Processing & Metallurgy Review*, **24**, 133-138.
- Majumder, A.K., Tiwari, V., Barnwal, J.P.,** 2007a. Separation characteristics of coal Fines in a Knelson concentrator-a Hydrodynamic approach, *Coal Preparation*, **27**, 126-137.

- Malvik, T., Sandvik, K. L., and Rein, A.,** 1997. Scandinavian experiences with the Kelsey centrifugal jig, *Innovation in Physical Separation Technologies*, Falmouth: IMM, 113-122.
- McAlister, S.,** 1992. Case studies in the use of the Falcon gravity concentrator, *24<sup>th</sup> Annual Canadian Mineral Processors Conference*, Ottawa, ON, Canada.
- McAlister, S.,** 2002. *Selecting Batch-Type Fluidised Bed Enhanced Gravity Concentrating Equipment*, Report by Falcon Inc, Vancouver, Canada.
- McAlister, S., Armstrong, K. C.,** 1998. Development of the Falcon Concentrators, *Presentation at the SME Annual Meeting*, Orlando, Florida.
- McLeavy, M., Klein, B., and Grewal, I.,** 2001. Knelson continuous variable discharge concentrator: Analysis of operating variables, *International Heavy Minerals Conference*, Fremantle, WA, 119-125.
- Mishra, B. K., Mehrotra, S. P.,** 1998. Modelling of particle stratification in jigs by the discrete element, *Minerals Engineering*, **11**, 6, 511-522.
- Mishra, B. K., Mehrotra, S. P.,** 2001. A jig model based on the discrete element method and its experimental, *International Journal of Mineral Processing*, **63**, 4, 177-189.
- Montgomery, D.C.,** 2001. *Design and Analysis of Experiments*, 5<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons, New York.
- Montgomery, D.C.,** 2005. *Design and Analysis of Experiments*, 6<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons, New York.
- Montgomery, D.C.,** 2009. *Design and Analysis of Experiments*, 7<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons, New York.
- Myers, R. H. ve Montgomery, D.C.,** 1995. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley and Sons, New York.
- Obeng D. P., Morrell, S., Napier T. J. N.,** 2005. Application of central composite rotatable design to modeling the effect of some operating variables on the performance of the three-product cyclone, *International Journal of Mineral Processing*, **76**, 3, 181-192.
- Operations and Maintenance Manual,** 2006. *Falcon Semi-Batch Concentrator Model SB40 Catalogue*, SB40 R2.0, 14.
- Oruç, F., Özgen, S., Sabah, E.,** 2010. An enhanced-gravity method to recover ultra-fine coal from tailings: Falcon Concentrator, *Fuel*, **89**, 2433-2437.
- Osborne, D. G.,** 1988. *Coal Preparation Technology*, Graham & Trotman, Boston.
- Özer, M., Önal, G.,** 2003. Concentration of Chromite Slimes by Multi Gravity Separator, *Mineral Processing in the 21<sup>th</sup> Century, Proceeding of X-Balkan Mineral Processing Congress*, 575-578, Varna, Bulgaria.
- Özgen, S., Yıldız, A., Çalışkan, A., Sabah, E.,** 2009. Modeling and optimization of hydrocyclone processing of Low grade bentonites, *Applied Clay Science*, **46**, 305-313.

- Özgen, S., Malkoç, Ö., Doğancık, C., Sabah, E., Şapçı F. O.,** 2011. Optimization of a Multi Gravity Separator to produce clean coal from Turkish lignite fine coal tailings, *Fuel*, **90**, 4, 1549-1555.
- Özler, C.,** 1997. Cevap yüzeyi yöntemlerinin süreç iyileştirme amacı ile kullanılması üzerine bir araştırma, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Anabilim Dalı.
- Özyurt, İ.,** 2006. Biyokütle atık madde olarak ayçiçeği çekirdeği kabuklarının sınıflandırılması ve elde edilen ürünlerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Parekh, B.K., Abdel-Khalekh, M. A.,** 2002. Using Falcon concentrator, as a new technology, for removal of environmental pollutants of Egyptian coal, *Journal Ore Dressing*, **4** (7), 20-8.
- Paul, B.C. and Honaker, R.Q.,** 1994. *Production of Illinois basin compliance coal using enhanced gravity separation*, Final Technical Report, Fiscal Year 1993, Illinois Clean Coal Institute report 93-1/5.1B-1P, Carterville, Illinois.
- Ren, X., Li, Q., Zhang, Y. ve Liu, D.,** 1994. A New Centrifugal Separator for Recovering Minerals from Fine and Ultrafine Sizes, *Innovations in Minerals Processing*, Sudbury, 349-355
- Richards, R.G., Palmer, M.K.,** 1997. High capacity gravity separators a review of current status. *Miner. Eng.*, **10** (9), 973-982.
- Riley, D.M., Firth, B.A., Lockhart, N.C.,** 1995. Enhanced gravity separation, High Efficiency Fine Coal Preparation, *An International Symposium, Soc. of Mining, Metallurgy, & Explor.*, Littleton, Colorado, 79.
- Ryan, T. P.,** 2000. *Statistical methods for quality improvement, Second edition*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Soyer, A.,** 2008. Lipaz enzimi biyokatalizörlüğünde kinetik rezolüsyon ile enantiyomerik saflıkta 1-fenil-1-propanolün üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Söderlund, J. and Johansson, B.,** 2005. Knelson Concentrator - New Gravity Equipment at the Boliden Concentrator, (<http://www.knelsongravitysolutions.com/sites/knelsongravity/files/BolidenMineralABTechnicalPaper.pdf>).
- Sönmez, E., Turgut, B.,** 1998. Enrichment of Low-grade Karaburun Chromite Ores by Gravitational Methods, *Innovations in Mineral and Coal Processing, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium*, 723-726, İstanbul, Türkiye.
- Torak, E. R. and Suardini, P. J.,** 1997. *Bench-scale testing of the micronized magnetite process*, U. S. Department of Energy, Final Report No. DE-AC22-93PC92206.
- Traore, A., Conil, P., Houot, R., and Save, M.,** 1995. An evaluation of the Mozley MGS for fine particle gravity separation, *Minerals Engineering*, **8**(7), 767-778.

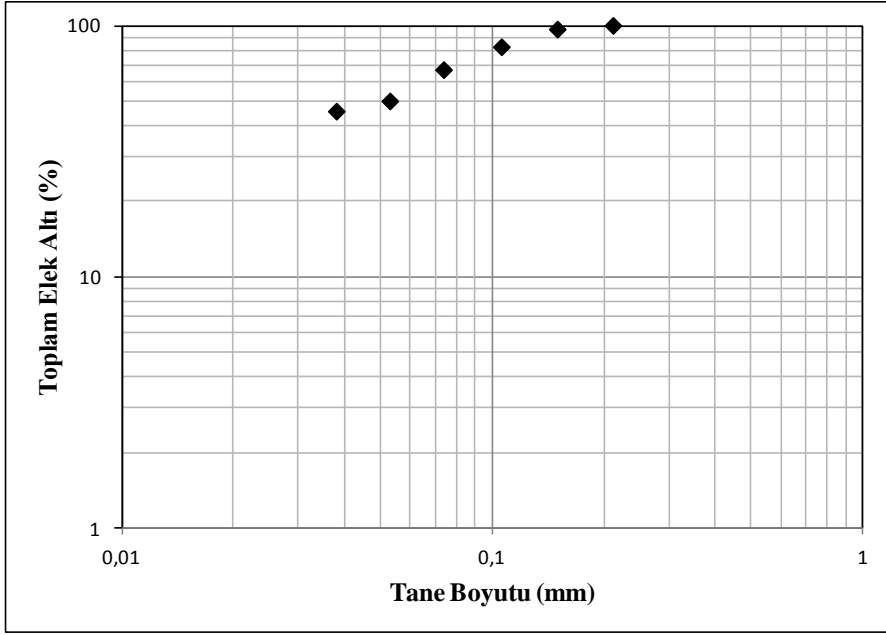
- Tucker, P.**, 1995. Modelling the Kelsey centrifugal jig, *Minerals Engineering*, **8**(3), 333-336.
- Tucker, P., Chan, S. K., Mozley, R. H., and Childs, G. J. C.**, 1991. Modelling the multi-gravity separator, *XVII International Mineral Processing Congress*, Dresden, The Netherlands.
- Turan, M. D. ve Altundoğan, H. S.**, 2011. Hidrometalurjik Araştırmalarda Yanıt Yüzey Yöntemlerinin (YYY) Kullanımı, *Madencilik*, **50**, 3, 11-23
- Turhan, G. D.**, 2006. Azo boyarmaddelerinin fotokimyasal prosesler ile giderimi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
- Venkatraman, P., Luttrell, G.H. & Yoon, R.H.**, 1995. Fine coal cleaning using the multi-gravity separator, *High Efficiency Coal Preparation: An International Symposium*, S.K. Kawatra, ed., SME, Littleton, Colorado, 109
- Wills, B., Napier-Munn, T.**, 2006. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (7. Edition)*, Butterworth-Heinemann, İngiltere
- Xiao, J.**, 1998. Testing A New Gold Centrifugal Concentrator, *Doktora Tezi*, McGill Üniversitesi, Montréal, Kanada,
- Yerriswamy, P., Barnwal, J. P., Govindarajan, B., Gupta, B. K., and Rao, T. C.**, 2002. Influence of variables of multi-gravity separator on rejection of graphite from a lead concentrate, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* (Trans. Inst. Min. Metall. C), Sept.-Dec., 111, C156-C159.
- Zhang, B.**, 1998. Recovering Gold from High Density Gangues with Knelson Concentrator, *Yüksek Lisans Tezi*, McGill Üniversitesi, Kanada.
- Url-1** <<http://www.seprosystems.com/images/stories/falcon/pdf/sb-12.pdf>>, alındığı tarih 14.02.2011.
- Url-2** <[http://www.ca.all.biz/zoom\\_item.php?oid=174&what=draw](http://www.ca.all.biz/zoom_item.php?oid=174&what=draw)>, alındığı tarih 14.09.2011.
- Url-3** <<http://www.austrade.gov.au/ArticleDocuments/1418/OZMINE-2009-Day-2-Technology-Improvements.pdf.aspx>>, alındığı tarih 19.09.2010.
- Url-4** <<http://www.knelson.com/>>, alındığı tarih 18.06.2011.
- Url-5** <<http://www.seprosystems.com/images/stories/sepro/pdf/sepro-new-address-brochure.pdf>>, alındığı tarih 10.03.2011.
- Url-6** <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>> (İndirilebilir doküman: <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/NIST/ehb-chapters-1-8.pdf>), alındığı tarih 11.04.2011.



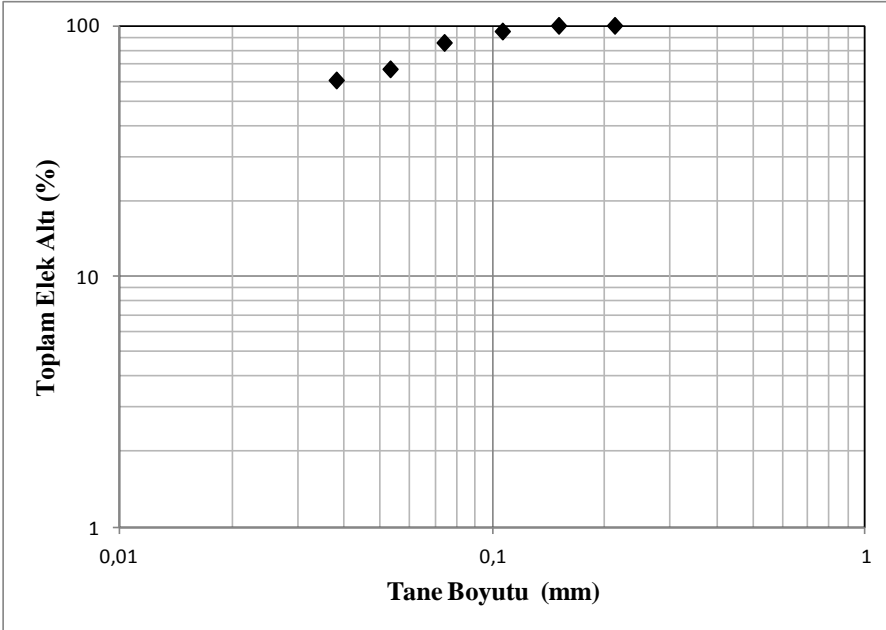
## **EKLER**

**EK A:** Deneysel Çalışmalarda Elde Edilen Veriler.

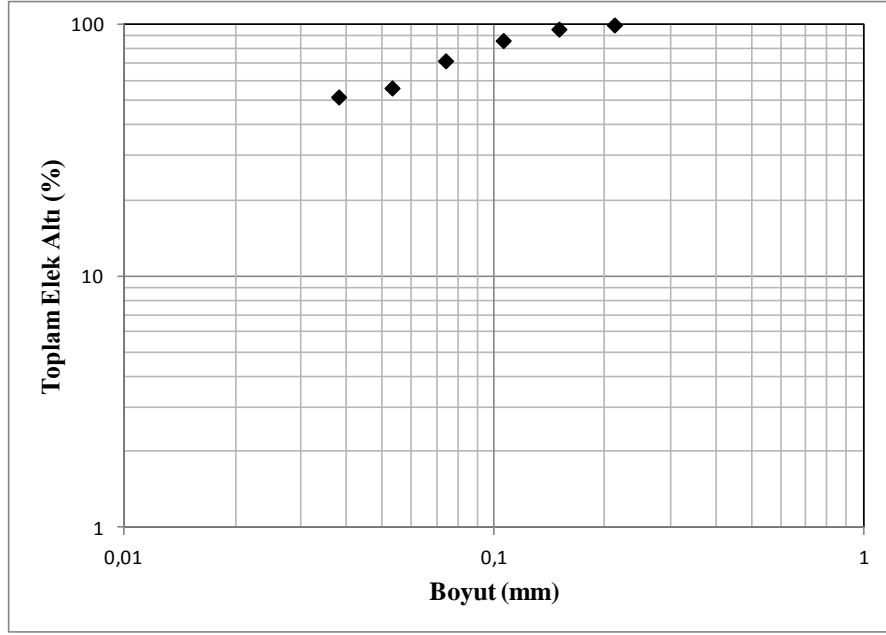
## EK A: Deneysel Çalışmalarda Elde Edilen Veriler



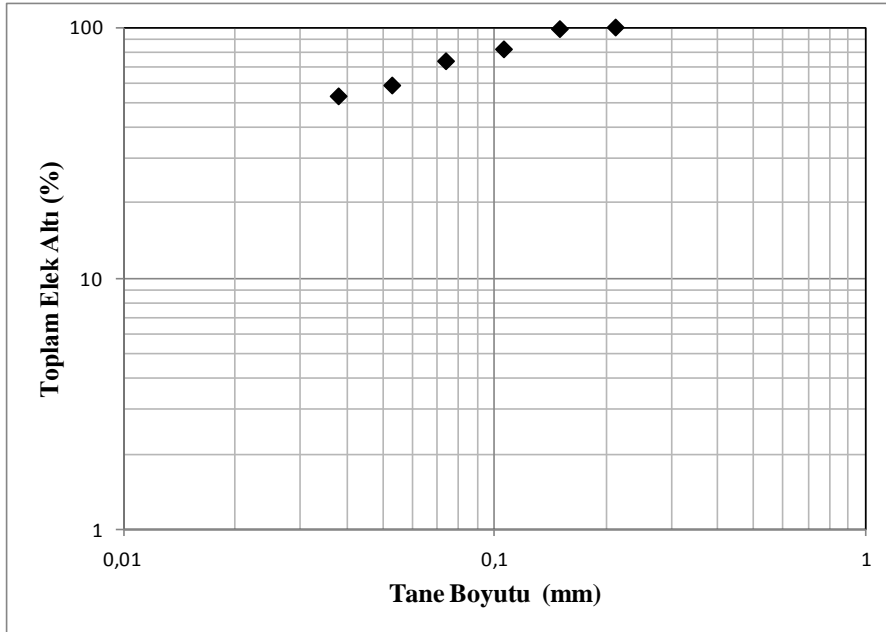
Şekil A.1 : %10 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



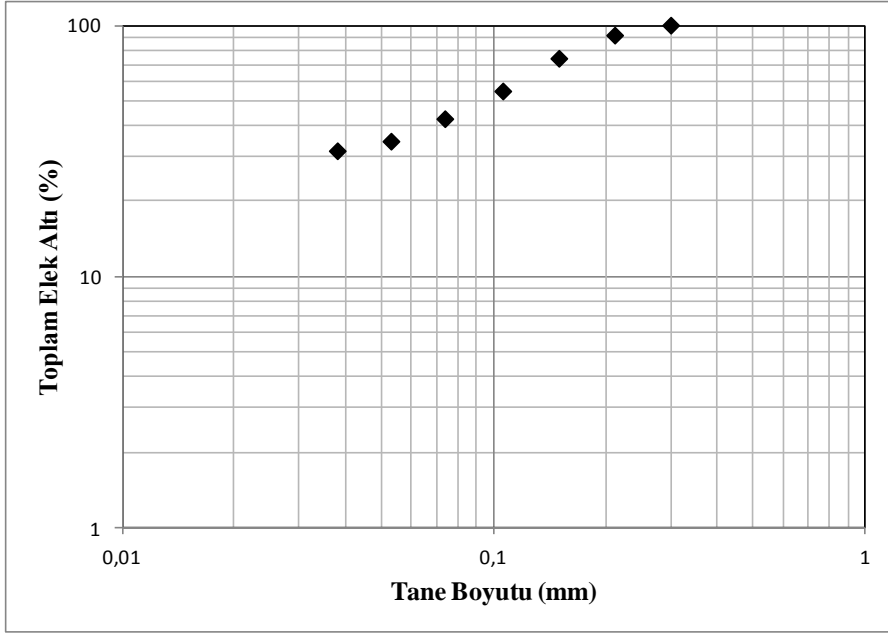
Şekil A.2 : %20 Küllü, -106 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



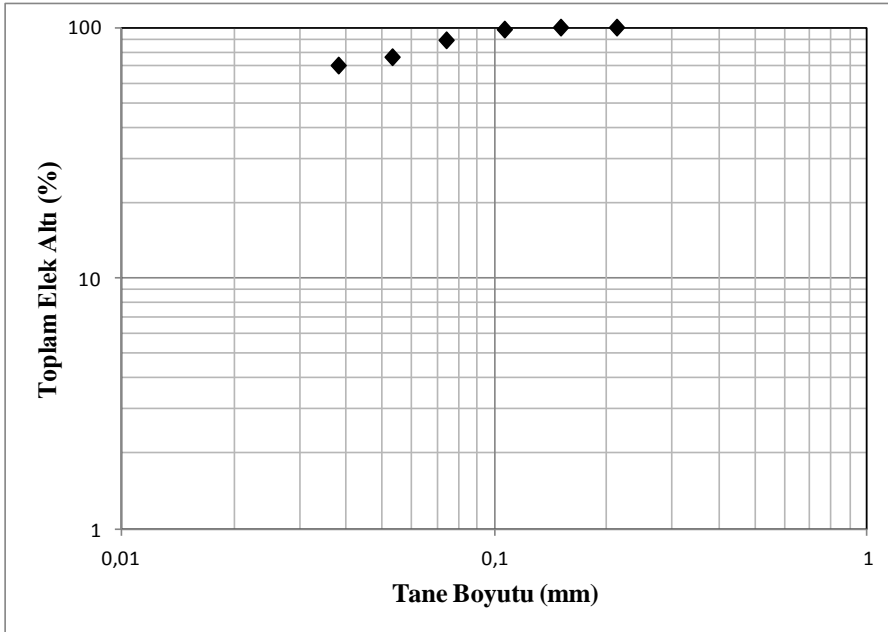
Şekil A.3 : %20 Küllü, -212 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



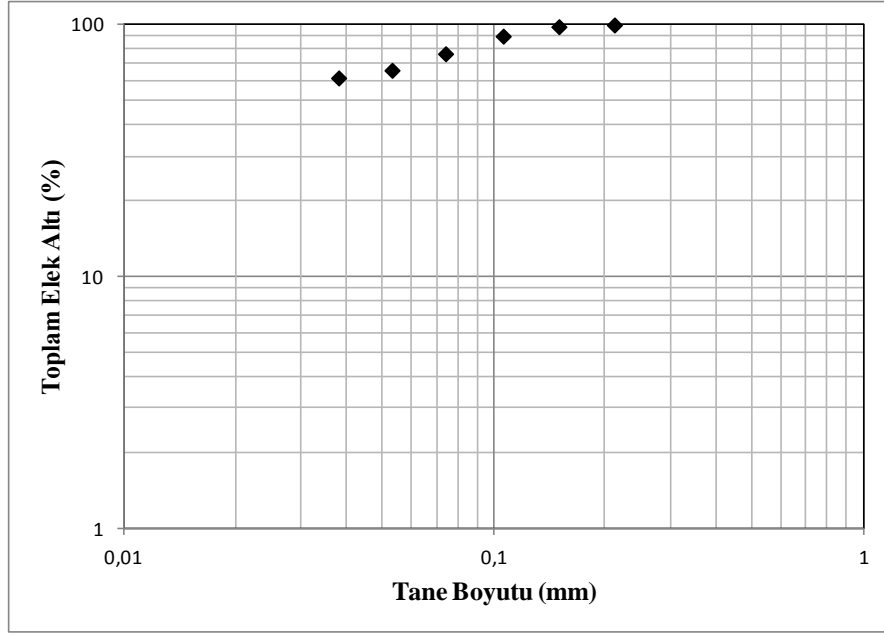
Şekil A.4 : %30 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



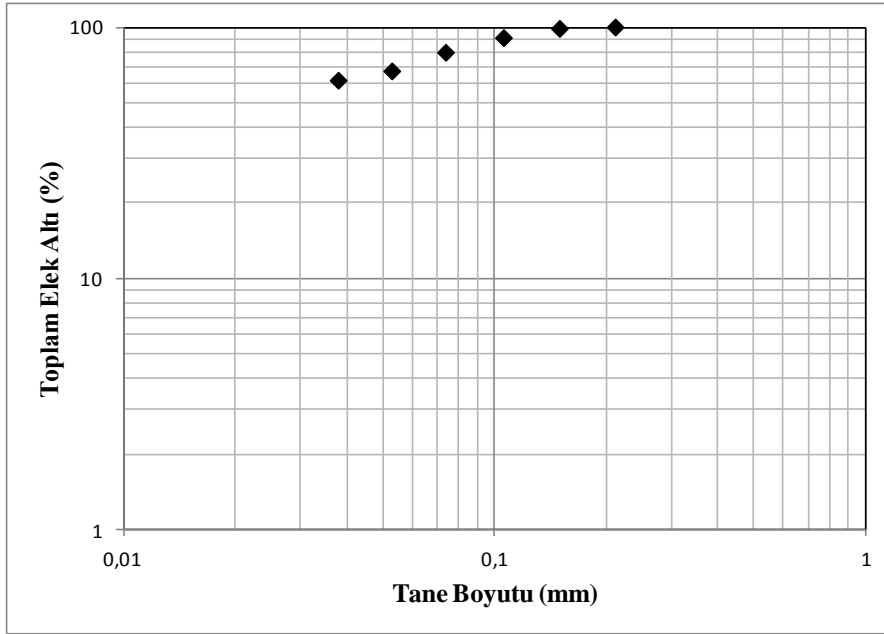
**Şekil A.5 :** %30 Küllü, -300 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



**Şekil A.6 :** %40 Küllü, -106 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



Şekil A.7 : %40 Küllü, -212 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi



Şekil A.8 : %50 Küllü, -150 mikron olacak şekilde hazırlanmış numunenin tane boyut dağılım eğrisi

**Çizelge A.1 : Kil zenginleştirme deneyleri için metalurjik denge tablosu**

Deney No	Bağımsız Değişkenler				Deneysel Sonuçlar				
	G	PKO (%)	BH (l/dk.)	BM (l)	Miktar (%)		KDK (meq/100 g)		
					K	A	K	A	T
1	90	4	4	2,75	79,1	20,9	94	6	76
2	160	6	3	3,50	76,6	23,4	93	5	72
3	230	8	4	1,25	80,5	19,5	92	6	75
4	90	8	4	1,25	81,9	18,1	91	5	75
5	230	4	4	2,75	76,7	23,3	94	5	73
6	90	4	2	2,75	78,8	21,2	94	5	75
7	230	4	2	1,25	74,0	26,0	92	6	70
8	160	6	3	2,00	77,0	23,0	95	5	74
9	20	6	3	2,00	83,8	16,2	90	5	76
10	160	6	3	2,00	86,2	13,8	94	7	82
11	160	6	5	2,00	82,4	17,6	92	6	77
12	90	8	2	2,75	82,7	17,3	80	5	67
13	160	6	3	2,00	71,2	28,8	95	5	69
14	160	6	3	2,00	75,4	24,6	88	5	68
15	300	6	3	2,00	73,7	26,3	101	4	75
16	160	6	3	0,50	76,2	23,8	90	10	71
17	230	8	4	2,75	80,9	19,1	83	5	68
18	230	4	4	1,25	79,4	20,6	94	6	76
19	160	6	3	2,00	73,0	27,0	90	5	67
20	230	8	2	1,25	78,9	21,1	94	6	75
21	160	2	3	2,00	73,6	26,4	84	6	63
22	90	8	4	2,75	83,1	16,9	82	5	69
23	160	10	3	2,00	81,8	18,2	79	5	65
24	160	6	3	2,00	84,2	15,8	94	7	80
25	230	4	2	2,75	69,3	30,7	92	5	65
26	90	4	4	1,25	78,5	21,5	92	7	74
27	90	4	2	1,25	73,9	26,1	88	7	67
28	90	8	2	1,25	80,7	19,3	90	5	74
29	160	6	1	2,00	72,3	27,7	96	5	71
30	230	8	2	2,75	69,1	30,9	92	5	65
31	160	6	3	2,00	76,0	24,0	95	5	73
32	20	2	3	2,00	60,3	39,7	83	8	61
33	20	4	3	2,00	82,6	17,4	91	5	76
34	20	6	3	2,00	82,3	17,7	87	5	72
35	20	8	3	2,00	88,0	12,0	86	11	77
36	20	10	3	2,00	85,7	14,3	76	12	67
37	300	2	3	2,00	78,2	21,8	94	9	75
38	300	4	3	2,00	76,3	23,7	102	6	79
39	300	6	3	2,00	74,0	26,0	99	6	75
40	300	8	3	2,00	78,2	21,8	86	5	68
41	300	10	3	2,00	83,1	16,9	83	5	70

T: Tüvenan

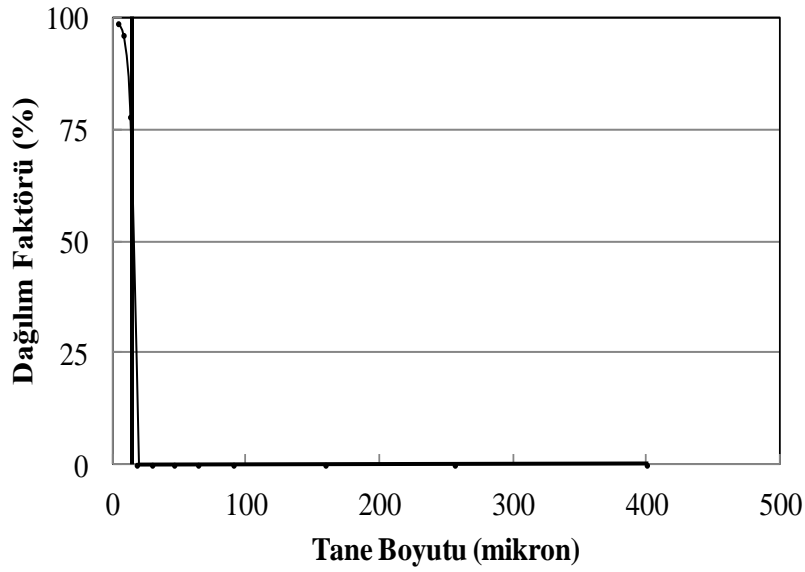
K : Konsantre

A: Artık



**Çizelge A.3 :** 1 nolu deney için dağılım tablosu.

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,6	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-500+300	5,1	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	12,6	0	3,3	0,0	3,3	0,0
-212+106	37,3	0	9,7	0,0	9,7	0,0
-106+74	8,1	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-74+53	11,8	0	3,1	0,0	3,1	0,0
-53+38	7,8	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-38+20	5,8	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-20+15	2,5	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	2,4	3	0,6	2,2	2,8	78,0
-10+5	2,4	22	0,6	16,3	16,9	96,3
-5+2	1,6	50	0,4	37,0	37,4	98,9
-2	1,2	25	0,3	18,5	18,8	98,4
Toplam	100,0	100	26,1	73,9	100,0	

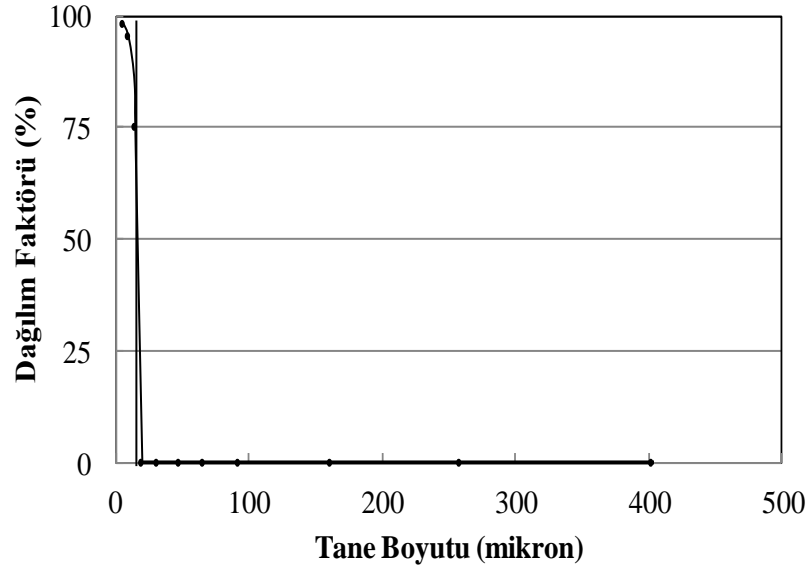


**Şekil A.9 :** 1 nolu deney için dağılım eğrisi.



**Çizelge A.4** : 2 nolu deney için dağılım tablosu.

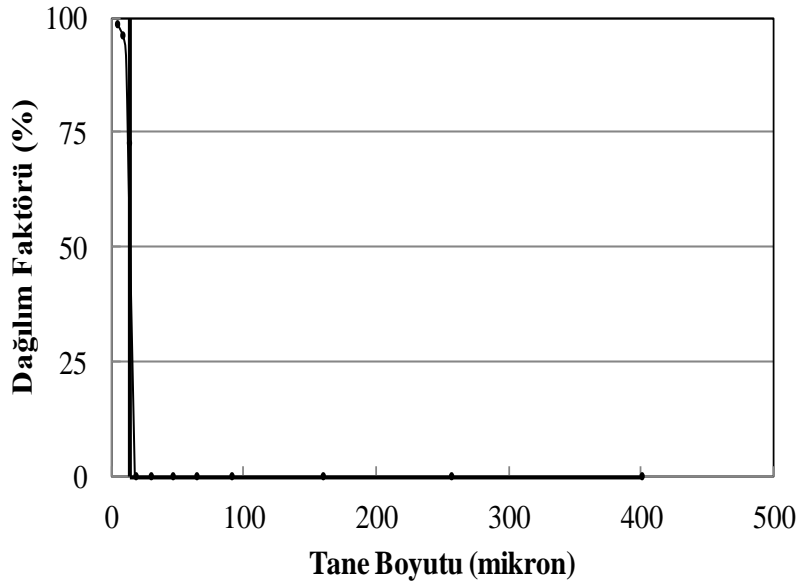
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,8	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-500+300	4,1	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-300+212	11,8	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-212+106	33,1	0	7,6	0,0	7,6	0,0
-106+74	9,0	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-74+53	8,9	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	5,8	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-38+20	10,1	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-20+15	3,0	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	3,3	3	0,8	2,3	3,1	75,2
-10+5	3,5	22,5	0,8	17,3	18,1	95,6
-5+2	2,8	48,5	0,6	37,3	38,0	98,3
-2	2,9	26	0,7	20,0	20,7	96,8
Toplam	100,0	100	23,0	77,0	100,0	



**Şekil A.10** : 2 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.5 : 3 nolu deney için dağılım tablosu.**

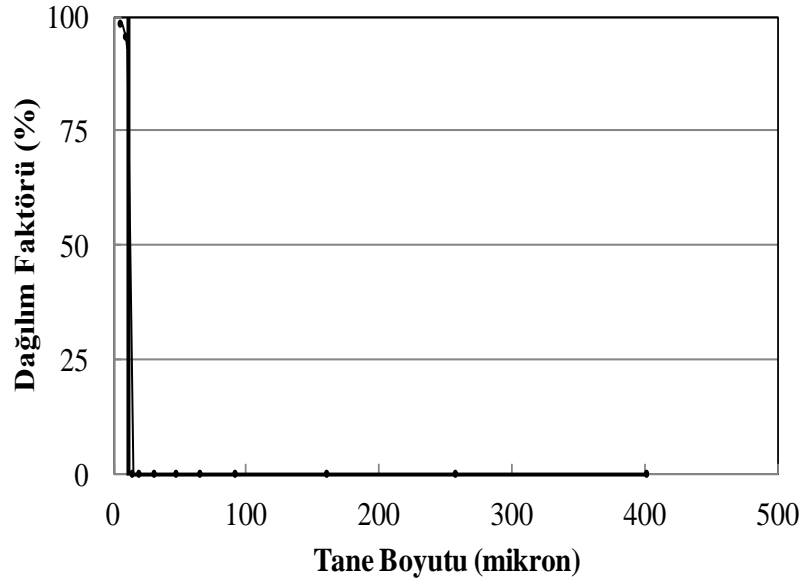
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	4,1	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	5,4	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-300+212	14,4	0	3,8	0,0	3,8	0,0
-212+106	36,3	0	9,6	0,0	9,6	0,0
-106+74	9,2	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-74+53	9,2	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-53+38	5,9	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-38+20	5,9	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-20+15	2,0	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,1	2	0,6	1,5	2,0	72,7
-10+5	2,4	22	0,6	16,2	16,8	96,3
-5+2	1,7	46	0,4	33,9	34,3	98,7
-2	1,4	30	0,4	22,1	22,5	98,4
Toplam	100,0	100	26,3	73,7	100,0	



**Şekil A.11 : 3 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.6 : 4 nolu deney için dağılım tablosu.**

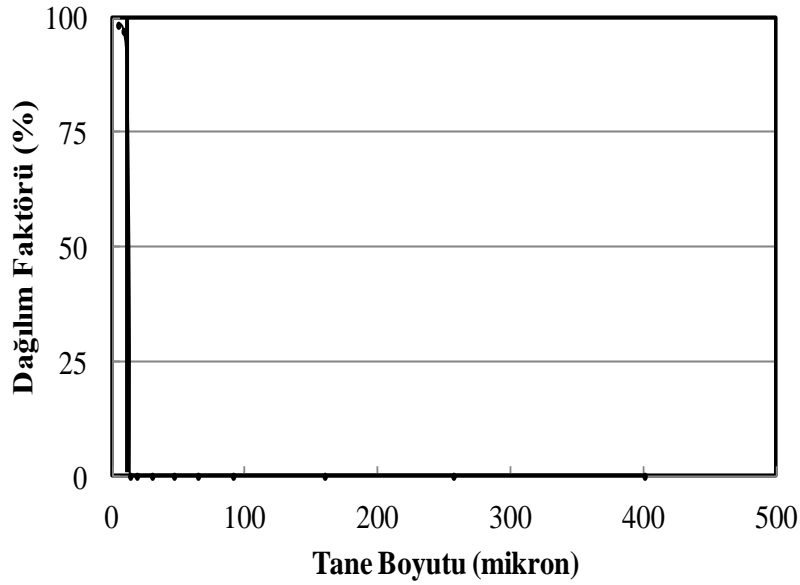
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,1	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-500+300	3,9	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-300+212	11,0	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-212+106	29,9	0	6,4	0,0	6,4	0,0
-106+74	9,8	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-74+53	9,3	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	5,4	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-38+20	11,6	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-20+15	3,5	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	3,3	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-10+5	3,8	23	0,8	18,1	18,9	95,7
-5+2	2,7	50	0,6	39,4	40,0	98,6
-2	2,7	27	0,6	21,3	21,8	97,4
Toplam	100,0	100	21,2	78,8	100,0	



**Şekil A.12 : 4 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.7 : 5 nolu deney için dağılım tablosu.**

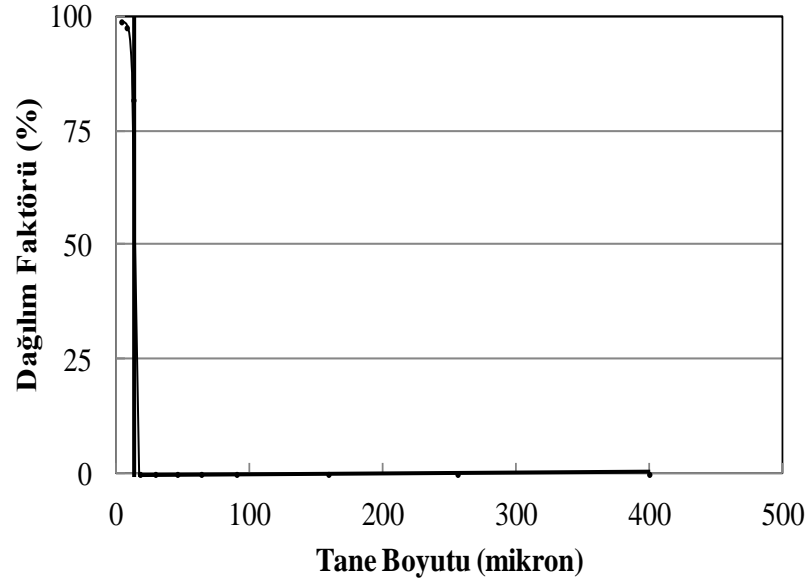
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,1	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-500+300	5,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-300+212	13,1	0	3,1	0,0	3,1	0,0
-212+106	29,7	0	7,0	0,0	7,0	0,0
-106+74	10,8	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-74+53	8,4	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	3,7	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-38+20	15,2	0	3,6	0,0	3,6	0,0
-20+15	3,0	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	2,9	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-10+5	2,6	26	0,6	19,9	20,5	97,0
-5+2	2,5	46	0,6	35,2	35,8	98,4
-2	0,0	28	0,0	21,4	21,4	100,0
Toplam	100,0	100	23,4	76,6	100,0	



**Şekil A.13 : 5 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.8** : 6 nolu deney için dağılım tablosu.

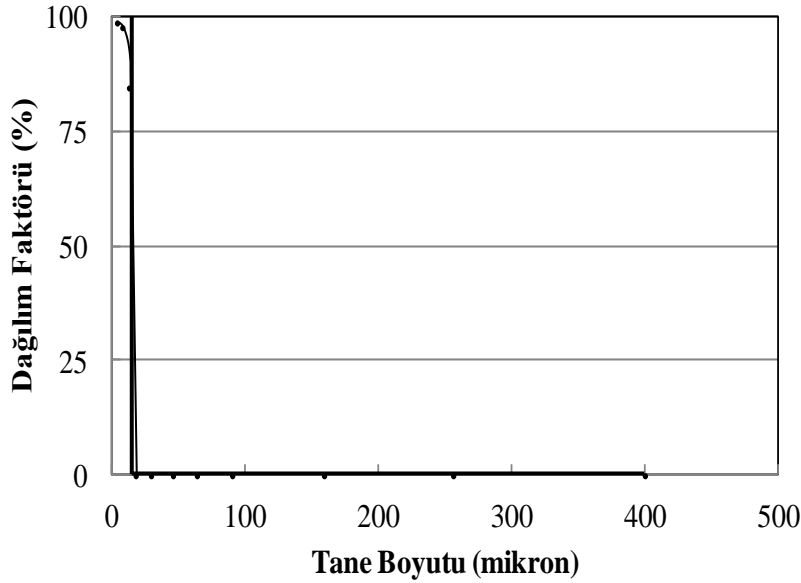
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	5,1	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	6,2	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	14,9	0	3,1	0,0	3,1	0,0
-212+106	32,7	0	6,8	0,0	6,8	0,0
-106+74	9,5	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-74+53	11,2	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-53+38	4,5	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-38+20	6,4	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-20+15	2,0	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-15+10	2,5	3	0,5	2,4	2,9	82,0
-10+5	2,3	27	0,5	21,4	21,8	97,8
-5+2	1,6	46	0,3	36,4	36,7	99,1
-2	1,2	24	0,3	19,0	19,2	98,7
Toplam	100,0	100	20,9	79,1	100,0	



**Şekil A.14** : 6 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.9 : 7 nolu deney için dağılım tablosu.**

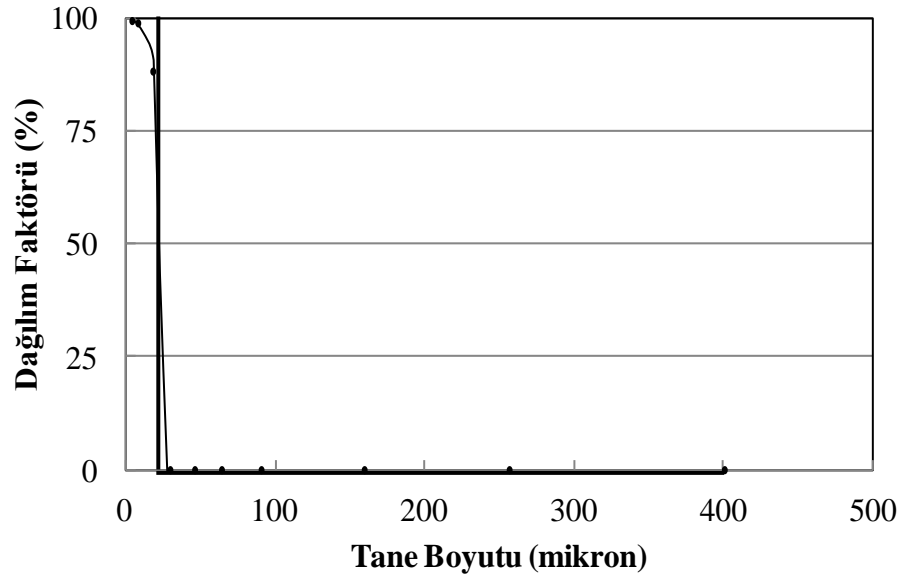
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri	İnce	İri	İnce		
	Malzeme	Malzeme	Malzeme	Malzeme		
+ 500	1,4	0	0,3	0,0	0,3	0,0
-500+300	3,9	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-300+212	13,4	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-212+106	35,3	0	6,7	0,0	6,7	0,0
-106+74	11,4	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-74+53	11,5	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-53+38	6,1	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	7,9	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-20+15	2,4	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,3	3	0,4	2,4	2,9	84,7
-10+5	2,3	24	0,4	19,4	19,8	97,8
-5+2	2,3	46	0,4	37,2	37,6	98,9
-2	0,0	27	0,0	21,8	21,8	100,0
Toplam	100,0	100	19,1	80,9	100,0	



**Şekil A.15 : 7 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.10** : 8 nolu deney için dağılım tablosu.

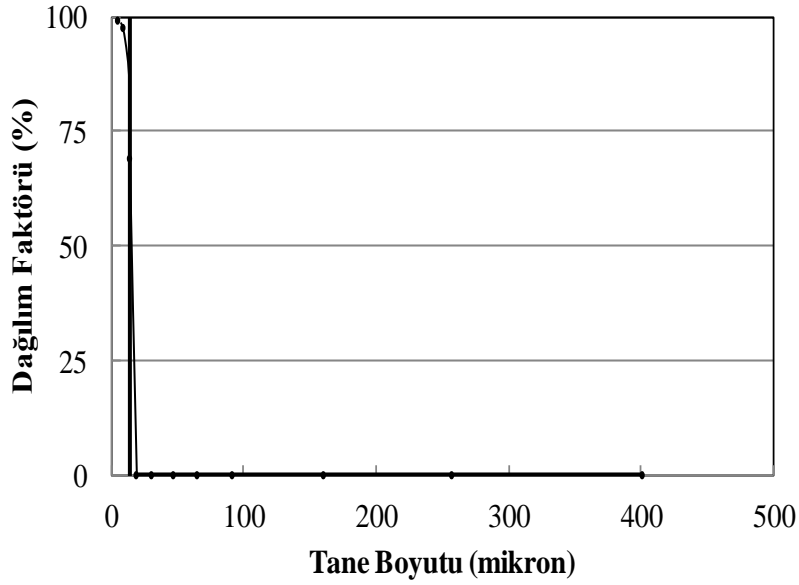
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	7,9	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-500+300	5,0	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-300+212	15,4	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-212+106	35,8	0	6,0	0,0	6,0	0,0
-106+74	9,0	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-74+53	9,9	0	1,7	0,0	1,7	0,0
-53+38	5,7	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-38+20	5,1	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-20+10	3,3	5	0,6	4,2	4,7	88,2
-10+5	1,5	26	0,3	21,6	21,9	98,8
-5+2	1,4	43	0,2	35,7	36,0	99,3
-2	0,0	26	0,0	21,6	21,6	100,0
Toplam	100,0	100	16,9	83,1	100,0	



**Şekil A.16** : 8 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.11** : 9 nolu deney için dağılım tablosu.

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	5,3	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-500+300	7,6	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-300+212	17,5	0	4,5	0,0	4,5	0,0
-212+106	34,4	0	8,9	0,0	8,9	0,0
-106+74	10,1	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-74+53	9,7	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-53+38	5,4	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	4,7	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-20+15	1,4	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-15+10	1,4	1,1	0,4	0,8	1,2	69,1
-10+5	1,3	19,1	0,3	14,1	14,5	97,7
-5+2	1,1	51,8	0,3	38,3	38,6	99,3
-2	0,0	28	0,0	20,7	20,7	100,0
Toplam	100,0	100	26,0	74,0	100,0	

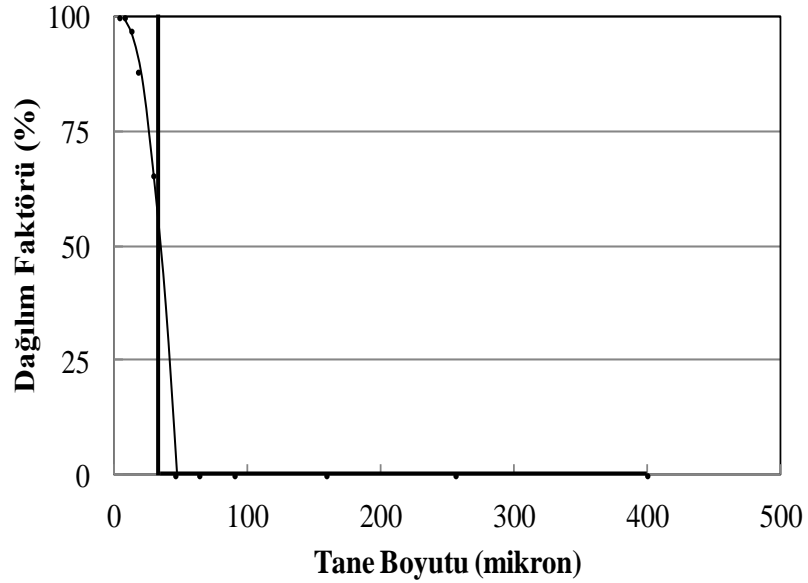


**Şekil A.17** : 9 nolu deney için dağılım eğrisi.



**Çizelge A.12 : 10 nolu deney için dağılım tablosu.**

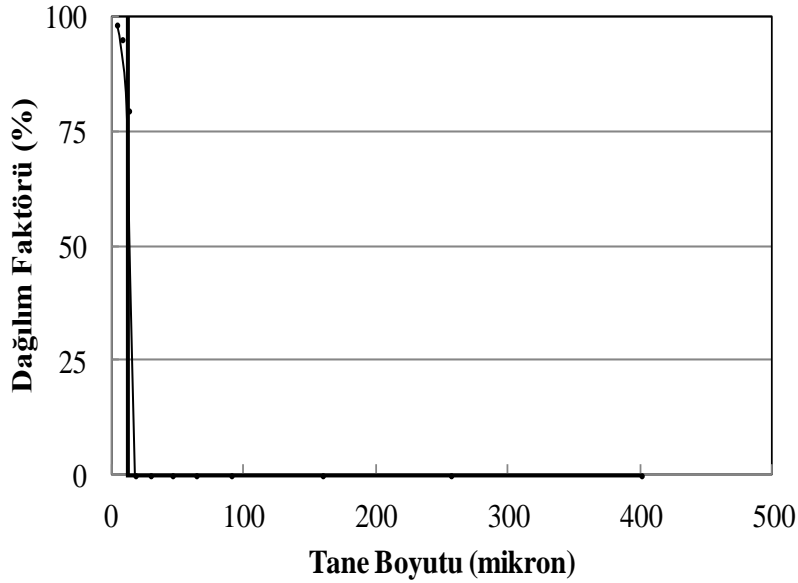
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	4,2	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-500+300	5,9	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-300+212	17,1	0	2,8	0,0	2,8	0,0
-212+106	41,9	0	6,8	0,0	6,8	0,0
-106+74	11,8	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-74+53	10,1	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-53+38	4,4	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-38+20	2,7	1	0,4	0,8	1,3	65,5
-20+15	0,7	1	0,1	0,8	1,0	88,1
-15+10	1,1	7	0,2	5,9	6,0	97,1
-10+5	0,0	26	0,0	21,8	21,8	100,0
-5+2	0,0	42	0,0	35,2	35,2	100,0
-2	0,0	23	0,0	19,3	19,3	100,0
Toplam	100,0	100	16,2	83,8	100,0	



**Şekil A.18 : 10 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.13** : 11 nolu deney için dağılım tablosu.

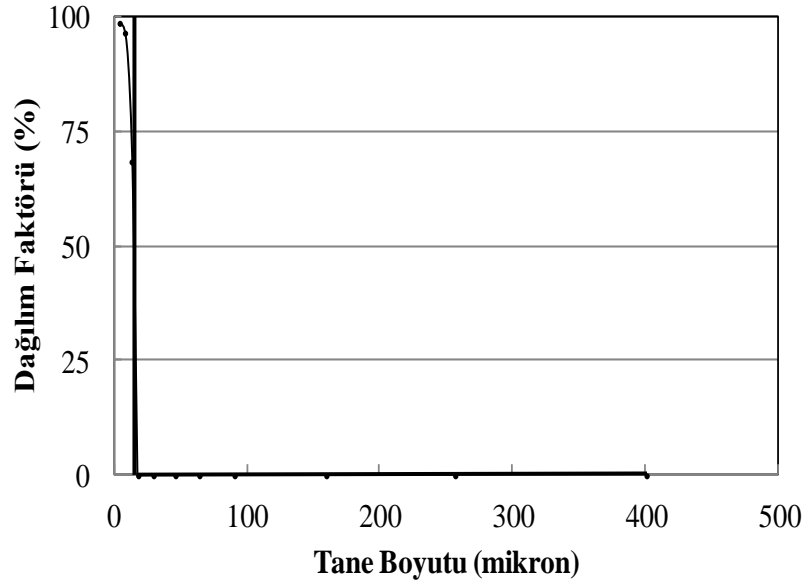
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	5,8	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	5,1	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-300+212	11,5	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-212+106	28,3	0	5,5	0,0	5,5	0,0
-106+74	7,3	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-74+53	8,4	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-53+38	4,9	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-38+20	11,2	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-20+15	3,5	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	3,2	3	0,6	2,4	3,0	79,6
-10+5	4,2	20	0,8	16,1	16,9	95,2
-5+2	3,2	47	0,6	37,9	38,5	98,4
-2	3,4	30	0,7	24,2	24,9	97,4
Toplam	100,0	100	19,3	80,7	100,0	



**Şekil A.19** : 11 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.14 : 12 nolu deney için dağılım tablosu.**

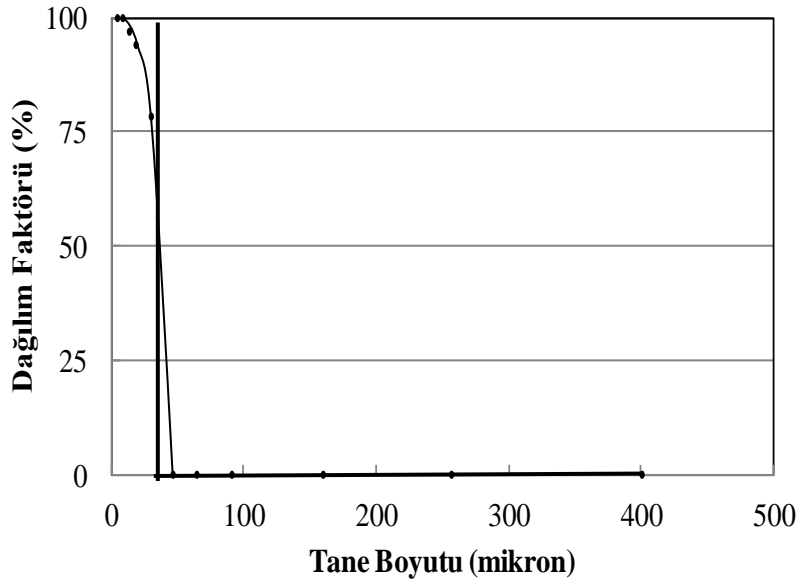
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,3	0	0,2	0,0	0,2	0,0
-500+300	2,6	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-300+212	6,2	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-212+106	21,4	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-106+74	12,0	0	1,7	0,0	1,7	0,0
-74+53	15,0	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-53+38	10,3	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	9,8	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-20+15	4,0	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	4,3	1,5	0,6	1,3	1,9	68,5
-10+5	5,1	23,5	0,7	20,3	21,0	96,6
-5+2	3,8	49	0,5	42,2	42,8	98,8
-2	4,3	26	0,6	22,4	23,0	97,4
Toplam	100,0	100	13,8	86,2	100,0	



**Şekil A.20 : 12 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.15** : 13 nolu deney için dağılım tablosu.

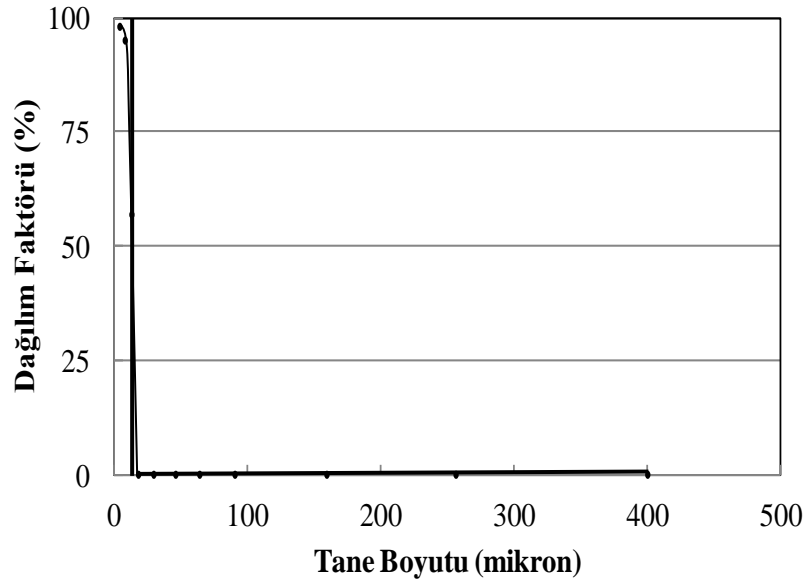
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	6,4	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-500+300	6,9	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	17,8	0	3,2	0,0	3,2	0,0
-212+106	42,7	0	7,8	0,0	7,8	0,0
-106+74	10,5	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-74+53	7,7	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-53+38	3,0	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-38+20	3,1	2,5	0,6	2,0	2,6	78,4
-20+15	0,7	2,5	0,1	2,0	2,2	94,1
-15+10	1,1	8	0,2	6,5	6,7	97,0
-10+5	0,0	22	0,0	18,0	18,0	100,0
-5+2	0,0	40	0,0	32,7	32,7	100,0
-2	0,0	25	0,0	20,4	20,4	100,0
Toplam	100,0	100	18,2	81,8	100,0	



**Şekil A.21** : 13 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.16** : 14 nolu deney için dağılım tablosu.

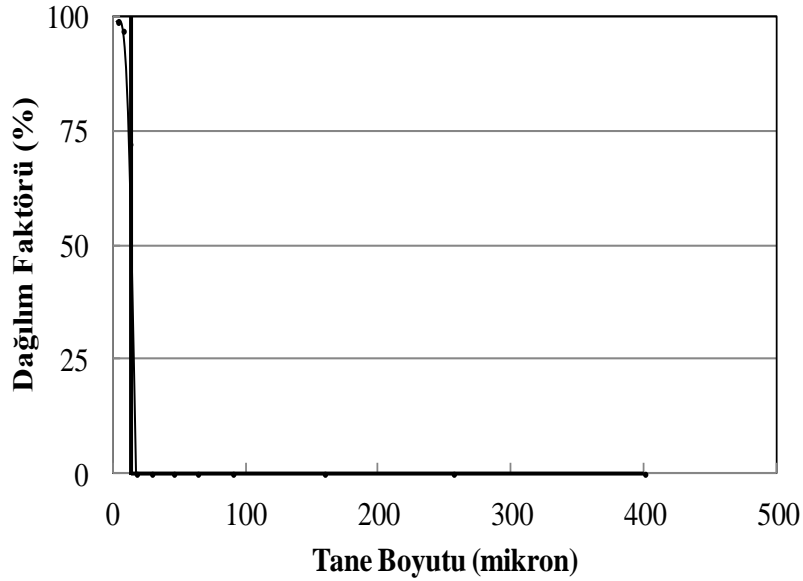
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,1	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-500+300	6,1	0	1,8	0,0	1,8	0,0
-300+212	14,3	0	4,1	0,0	4,1	0,0
-212+106	32,7	0	9,4	0,0	9,4	0,0
-106+74	9,5	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-74+53	8,3	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-53+38	5,2	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-38+20	8,2	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-20+15	2,2	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	2,8	1,5	0,8	1,1	1,9	56,9
-10+5	3,0	23,5	0,9	16,7	17,6	95,1
-5+2	2,3	48	0,7	34,2	34,8	98,1
-2	2,3	27	0,7	19,2	19,9	96,7
Toplam	100,0	100	28,8	71,2	100,0	



**Şekil A.22** : 14 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.17** : 15 nolu deney için dağılım tablosu.

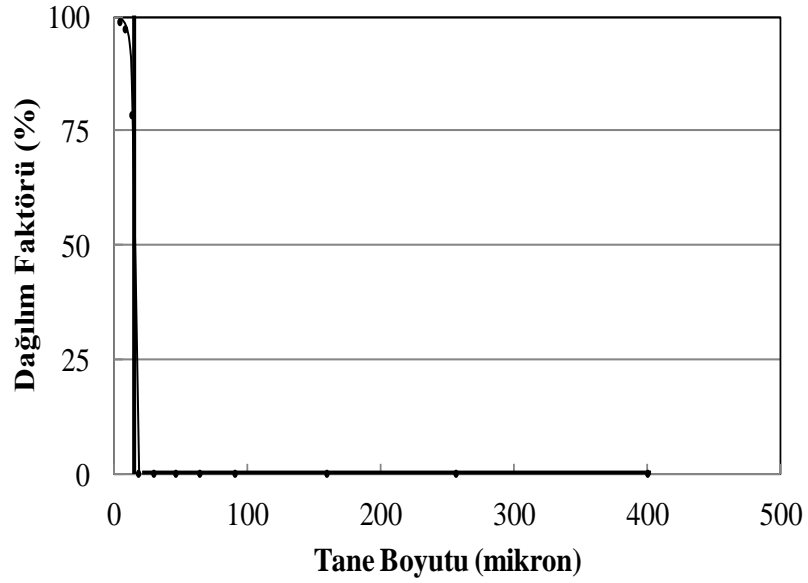
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,5	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	4,2	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-300+212	11,3	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-212+106	32,8	0	7,1	0,0	7,1	0,0
-106+74	10,4	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-74+53	10,7	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-53+38	6,6	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	10,0	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-20+15	2,8	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	2,8	2	0,6	1,6	2,2	72,3
-10+5	2,8	25	0,6	19,6	20,2	97,0
-5+2	1,9	48	0,4	37,7	38,1	99,0
-2	1,4	25	0,3	19,6	19,9	98,5
Toplam	100,0	100	21,5	78,5	100,0	



**Şekil A.23** : 15 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.18 : 16 nolu deney için dağılım tablosu.**

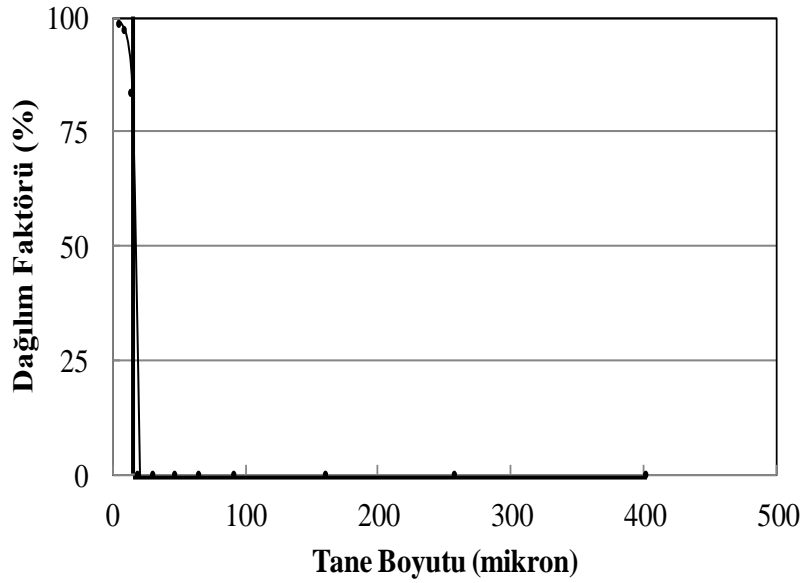
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	5,7	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-500+300	7,0	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-300+212	14,8	0	3,4	0,0	3,4	0,0
-212+106	32,8	0	7,6	0,0	7,6	0,0
-106+74	9,9	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-74+53	11,1	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-53+38	4,3	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-38+20	7,2	0	1,7	0,0	1,7	0,0
-20+15	1,8	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-15+10	1,8	2	0,4	1,5	2,0	78,5
-10+5	1,9	21	0,4	16,1	16,5	97,3
-5+2	1,8	50	0,4	38,3	38,8	98,9
-2	0,0	27	0,0	20,7	20,7	100,0
Toplam	100,0	100	23,3	76,7	100,0	



**Şekil A.24 : 16 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.19** : 17 nolu deney için dağılım tablosu.

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,2	0	0,3	0,0	0,3	0,0
-500+300	5,5	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	18,6	0	4,6	0,0	4,6	0,0
-212+106	41,2	0	10,1	0,0	10,1	0,0
-106+74	8,3	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-74+53	7,6	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-53+38	5,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	5,5	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-20+15	1,6	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-15+10	1,8	3	0,4	2,3	2,7	83,6
-10+5	1,8	22	0,4	16,6	17,0	97,4
-5+2	1,9	49	0,5	37,0	37,4	98,8
-2	0,0	26	0,0	19,6	19,6	100,0
Toplam	100,0	100	24,6	75,4	100,0	

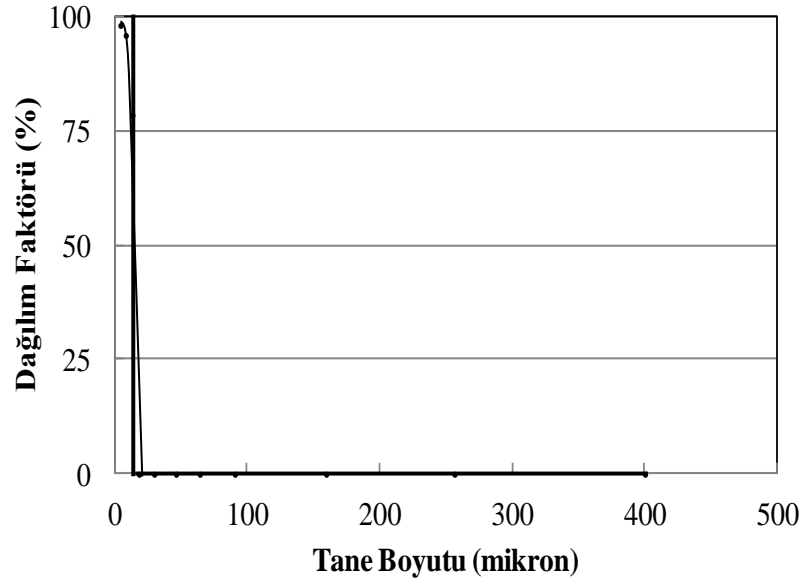


**Şekil A.25** : 17 nolu deney için dağılım eğrisi.



**Çizelge A.20 : 18 nolu deney için dağılım tablosu.**

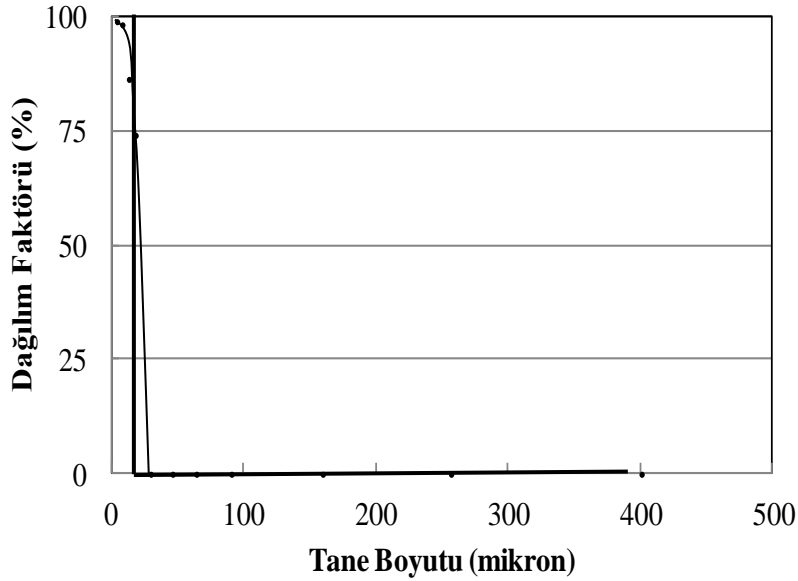
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,8	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	4,7	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	16,0	0	4,3	0,0	4,3	0,0
-212+106	37,6	0	10,1	0,0	10,1	0,0
-106+74	9,0	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-74+53	7,8	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-53+38	4,7	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-38+20	9,2	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-20+15	2,4	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	2,2	3	0,6	2,2	2,8	78,7
-10+5	2,3	21	0,6	15,3	16,0	96,1
-5+2	2,3	49	0,6	35,8	36,4	98,3
-2	0,0	27	0,0	19,7	19,7	100,0
Toplam	100,0	100	27,0	73,0	100,0	



**Şekil A.26 : 18 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.21 : 19 nolu deney için dağılım tablosu.**

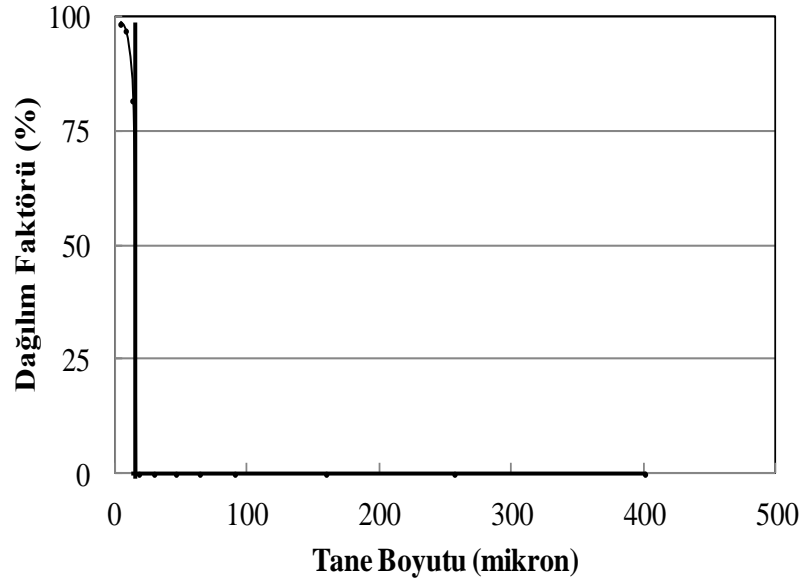
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,5	0	0,3	0,0	0,3	0,0
-500+300	4,4	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-300+212	12,7	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-212+106	37,6	0	6,5	0,0	6,5	0,0
-106+74	11,3	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-74+53	11,5	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	7,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	6,0	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-20+15	2,0	1,2	0,3	1,0	1,3	74,2
-15+10	2,1	2,8	0,4	2,3	2,7	86,5
-10+5	2,0	26	0,3	21,5	21,9	98,4
-5+2	1,9	44	0,3	36,4	36,7	99,1
-2	0,0	26	0,0	21,5	21,5	100,0
Toplam	100,0	100	17,3	82,7	100,0	



**Şekil A.27 : 19 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.22 : 20 nolu deney için dağılım tablosu.**

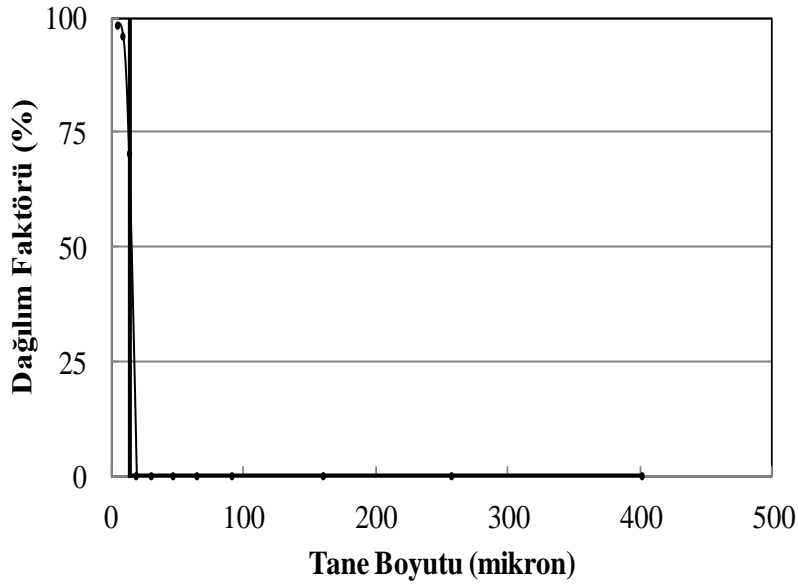
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,2	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	7,0	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-300+212	14,1	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-212+106	33,6	0	7,1	0,0	7,1	0,0
-106+74	8,9	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-74+53	9,7	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-53+38	5,7	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	8,8	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-20+15	2,4	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,5	3	0,5	2,4	2,9	81,8
-10+5	2,5	22	0,5	17,4	17,9	97,0
-5+2	2,6	47	0,5	37,1	37,6	98,5
-2	0,0	28	0,0	22,1	22,1	100,0
Toplam	100,0	100	21,1	78,9	100,0	



**Şekil A.28 : 20 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.23** : 21 nolu deney için dağılım tablosu.

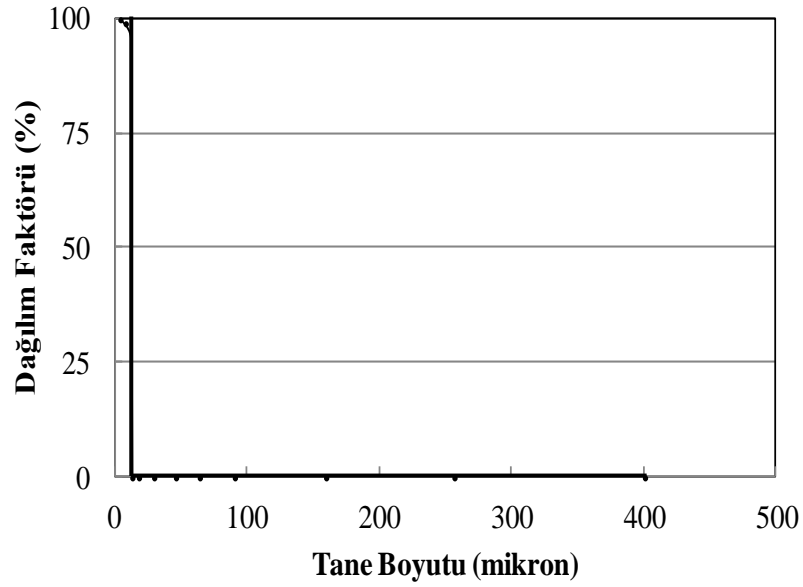
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,2	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	2,8	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-300+212	6,3	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-212+106	20,0	0	3,2	0,0	3,2	0,0
-106+74	10,9	0	1,7	0,0	1,7	0,0
-74+53	12,6	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	7,3	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-38+20	13,4	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-20+15	4,0	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	4,5	2	0,7	1,7	2,4	70,4
-10+5	5,3	24	0,8	20,2	21,1	96,0
-5+2	4,3	48	0,7	40,4	41,1	98,4
-2	5,4	26	0,9	21,9	22,8	96,3
Toplam	100,0	100	15,8	84,2	100,0	



**Şekil A.29** : 21 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.24 : 22 nolu deney için dağılım tablosu.**

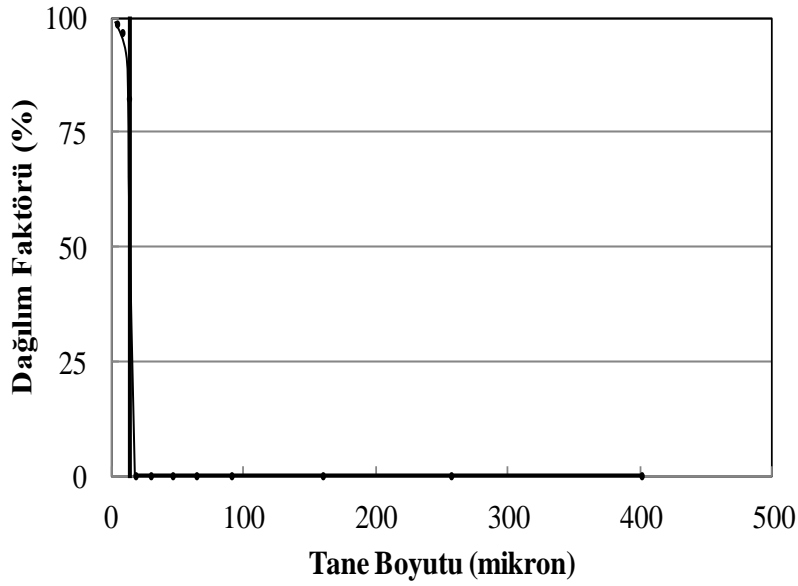
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,9	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	7,0	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	16,4	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-212+106	38,9	0	7,0	0,0	7,0	0,0
-106+74	11,3	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-74+53	12,1	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-53+38	5,6	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-38+20	2,6	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-20+15	1,0	0	0,2	0,0	0,2	0,0
-15+10	1,0	0	0,2	0,0	0,2	0,0
-10+5	1,2	30	0,2	24,6	24,8	99,1
-5+2	0,0	42,5	0,0	34,8	34,8	100,0
-2	0,0	27,5	0,0	22,5	22,5	100,0
Toplam	100,0	100	18,1	81,9	100,0	



**Şekil A.30 : 22 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.25** : 23 nolu deney için dağılım tablosu.

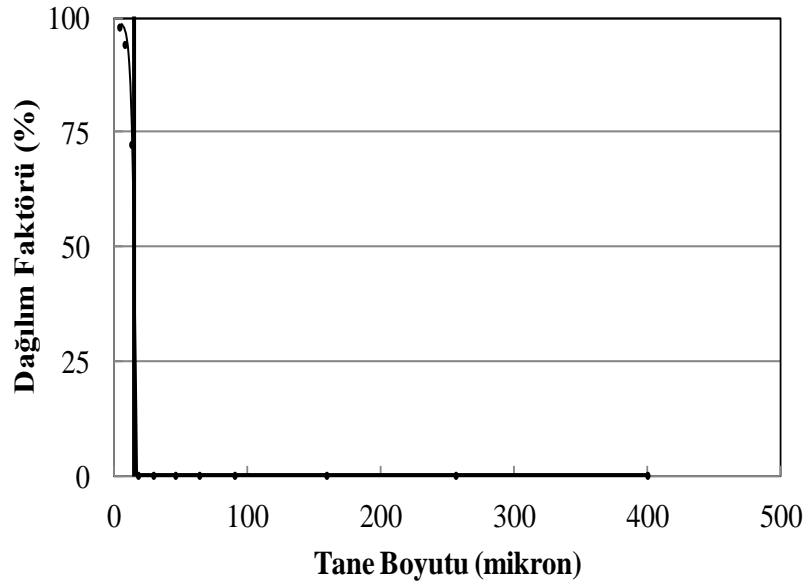
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,3	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-500+300	5,8	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-300+212	13,9	0	3,3	0,0	3,3	0,0
-212+106	32,7	0	7,8	0,0	7,8	0,0
-106+74	11,9	0	2,8	0,0	2,8	0,0
-74+53	10,5	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-53+38	5,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	7,9	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-20+15	2,2	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,4	3,5	0,6	2,7	3,2	82,4
-10+5	2,2	20,5	0,5	15,6	16,1	96,8
-5+2	2,2	50	0,5	38,1	38,6	98,6
-2	0,0	26	0,0	19,8	19,8	100,0
Toplam	100,0	100	23,8	76,2	100,0	



**Şekil A.31** : 23 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.26** : 24 nolu deney için dağılım tablosu.

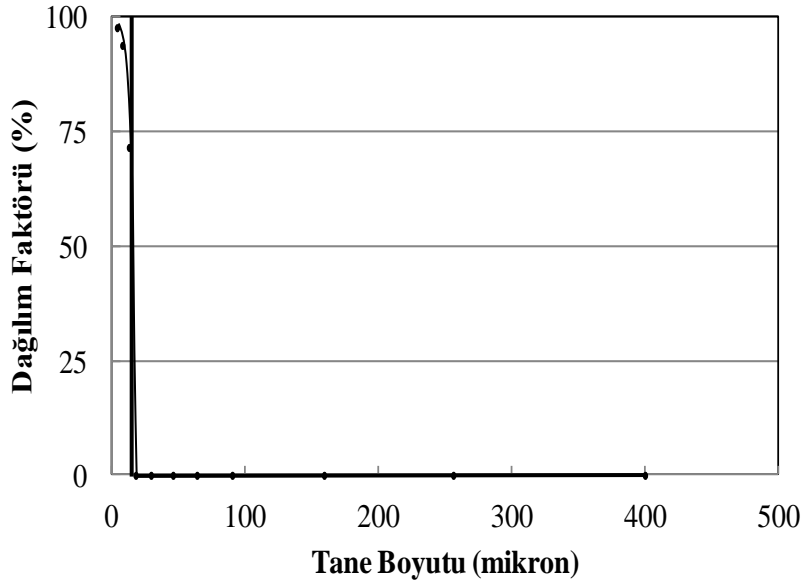
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,3	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-500+300	5,8	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-300+212	9,8	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-212+106	29,9	0	7,9	0,0	7,9	0,0
-106+74	10,1	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-74+53	9,0	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-53+38	4,9	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-38+20	11,3	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-20+15	3,0	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-15+10	3,2	3	0,8	2,2	3,1	72,3
-10+5	3,8	22	1,0	16,2	17,2	94,2
-5+2	2,9	50	0,8	36,8	37,6	98,0
-2	3,1	25	0,8	18,4	19,2	95,7
Toplam	100,0	100	26,4	73,6	100,0	



**Şekil A.32** : 24 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.27** : 25 nolu deney için dağılım tablosu.

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	4,1	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	5,4	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-300+212	12,6	0	3,5	0,0	3,5	0,0
-212+106	28,6	0	7,9	0,0	7,9	0,0
-106+74	9,0	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-74+53	8,4	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-53+38	5,0	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	10,9	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-20+15	3,5	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-15+10	3,1	3	0,9	2,2	3,0	71,6
-10+5	3,7	22	1,0	15,9	16,9	93,9
-5+2	2,8	48	0,8	34,7	35,5	97,8
-2	2,9	27	0,8	19,5	20,3	96,0
Toplam	100,0	100	27,7	72,3	100,0	

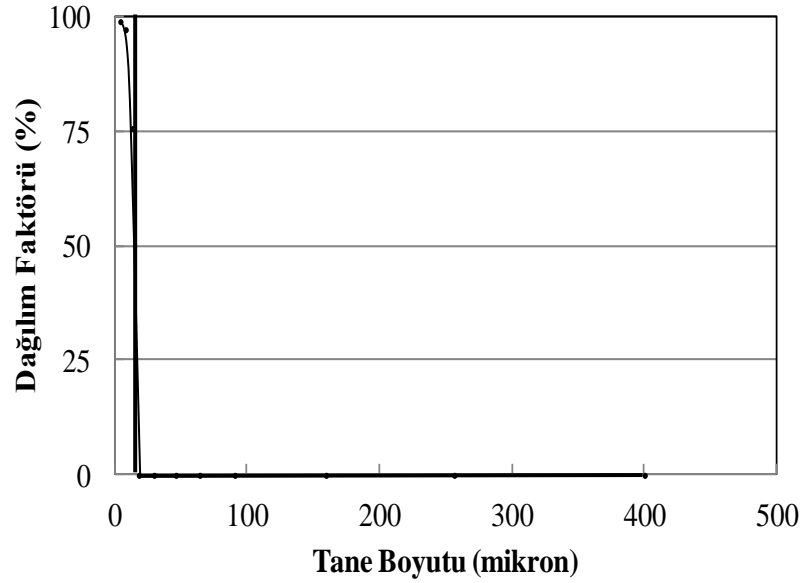


**Şekil A.33** : 25 nolu deney için dağılım eğrisi.



**Çizelge A.28** : 26 nolu deney için dağılım tablosu.

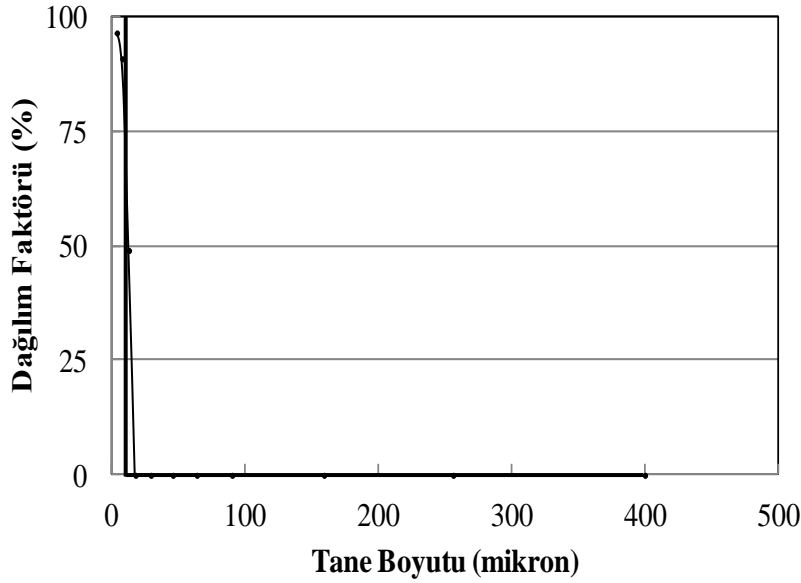
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,6	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-500+300	3,9	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-300+212	11,7	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-212+106	34,8	0	6,1	0,0	6,1	0,0
-106+74	9,1	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-74+53	10,2	0	1,8	0,0	1,8	0,0
-53+38	6,1	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-38+20	8,4	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-20+15	2,6	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	3,0	2	0,5	1,6	2,2	75,8
-10+5	2,9	23	0,5	19,0	19,5	97,4
-5+2	2,0	49	0,4	40,4	40,7	99,1
-2	1,5	26	0,3	21,4	21,7	98,8
Toplam	100,0	100	17,6	82,4	100,0	



**Şekil A.34** : 26 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.29** : 27 nolu deney için dağılım tablosu.

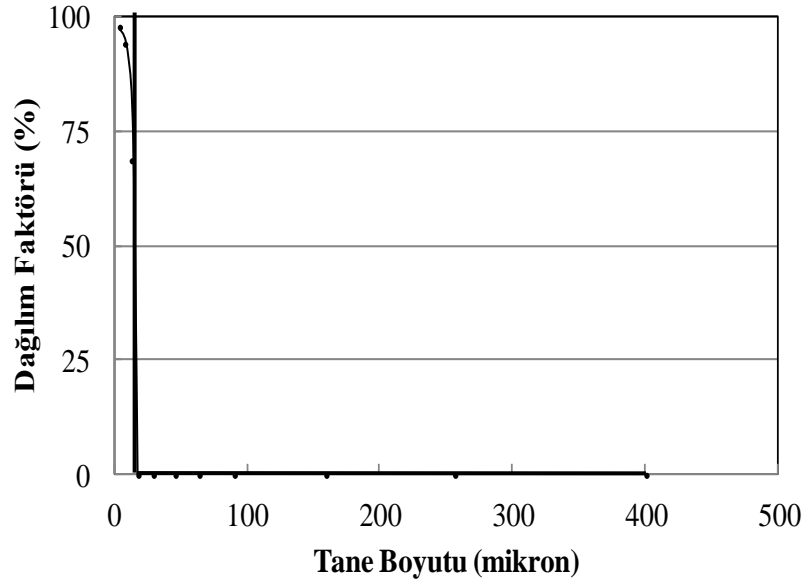
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,8	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-500+300	7,1	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-300+212	10,7	0	3,3	0,0	3,3	0,0
-212+106	26,8	0	8,2	0,0	8,2	0,0
-106+74	7,5	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-74+53	8,5	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-53+38	4,8	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-38+20	11,3	0	3,5	0,0	3,5	0,0
-20+15	4,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-15+10	3,5	1,5	1,1	1,0	2,1	49,1
-10+5	5,0	22,5	1,5	15,6	17,1	91,0
-5+2	3,8	49	1,2	33,9	35,1	96,7
-2	4,2	27	1,3	18,7	20,0	93,5
Toplam	100,0	100	30,7	69,3	100,0	



**Şekil A.35** : 27 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.30** : 28 nolu deney için dağılım tablosu.

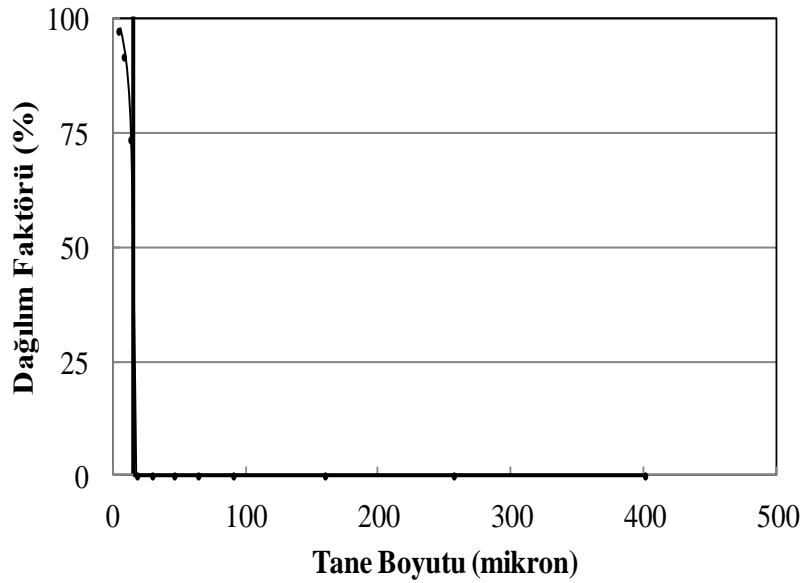
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,5	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	3,9	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-300+212	8,9	0	1,8	0,0	1,8	0,0
-212+106	28,3	0	5,8	0,0	5,8	0,0
-106+74	7,8	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-74+53	9,0	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-53+38	4,5	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-38+20	13,1	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-20+15	3,5	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	3,5	2	0,7	1,6	2,3	68,7
-10+5	5,2	22	1,1	17,5	18,5	94,2
-5+2	4,1	50	0,8	39,7	40,5	97,9
-2	5,7	26	1,2	20,6	21,8	94,6
Toplam	100,0	100	20,6	79,4	100,0	



**Şekil A.36** : 28 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.31 : 29 nolu deney için dağılım tablosu.**

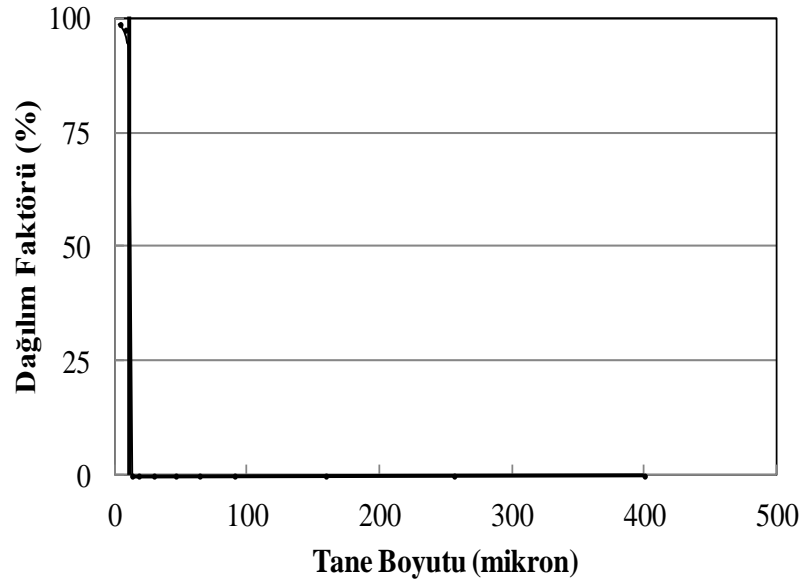
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,2	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-500+300	4,8	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-300+212	12,7	0	3,9	0,0	3,9	0,0
-212+106	30,2	0	9,3	0,0	9,3	0,0
-106+74	8,3	0	2,6	0,0	2,6	0,0
-74+53	9,4	0	2,9	0,0	2,9	0,0
-53+38	5,7	0	1,8	0,0	1,8	0,0
-38+20	10,5	0	3,3	0,0	3,3	0,0
-20+15	3,0	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-15+10	3,2	4	1,0	2,8	3,8	73,7
-10+5	4,0	20	1,2	13,8	15,1	91,8
-5+2	2,8	48	0,9	33,2	34,0	97,5
-2	3,0	28	0,9	19,4	20,3	95,4
Toplam	100,0	100	30,9	69,1	100,0	



**Şekil A.37 : 29 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.32 : 30 nolu deney için dağılım tablosu.**

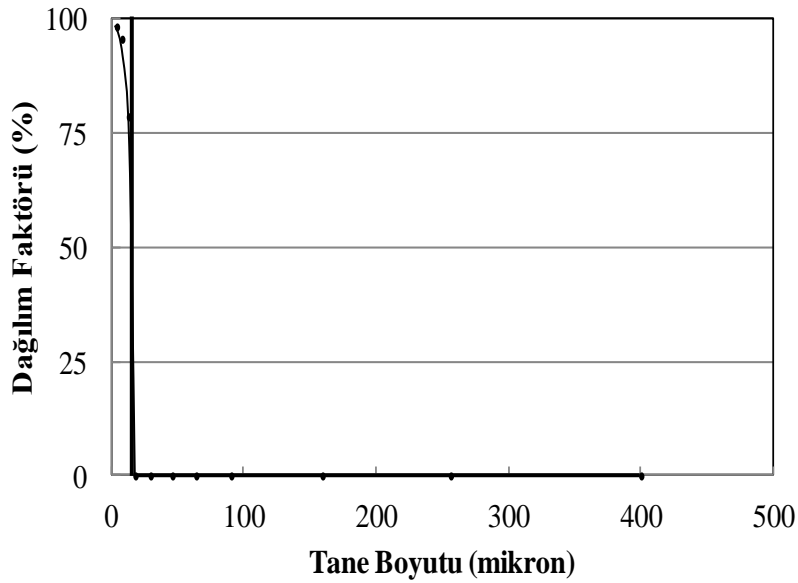
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	0,9	0	0,2	0,0	0,2	0,0
-500+300	6,1	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-300+212	21,3	0	4,2	0,0	4,2	0,0
-212+106	10,7	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-106+74	17,5	0	3,4	0,0	3,4	0,0
-74+53	11,2	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-53+38	8,0	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-38+20	11,8	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-20+15	3,0	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	3,5	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-10+5	3,0	31	0,6	24,9	25,5	97,7
-5+2	1,8	40	0,4	32,2	32,5	98,9
-2	1,2	29	0,2	23,3	23,6	99,0
Toplam	100,0	100	19,5	80,5	100,0	



**Şekil A.38 : 30 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.33** : 31 nolu deney için dağılım tablosu.

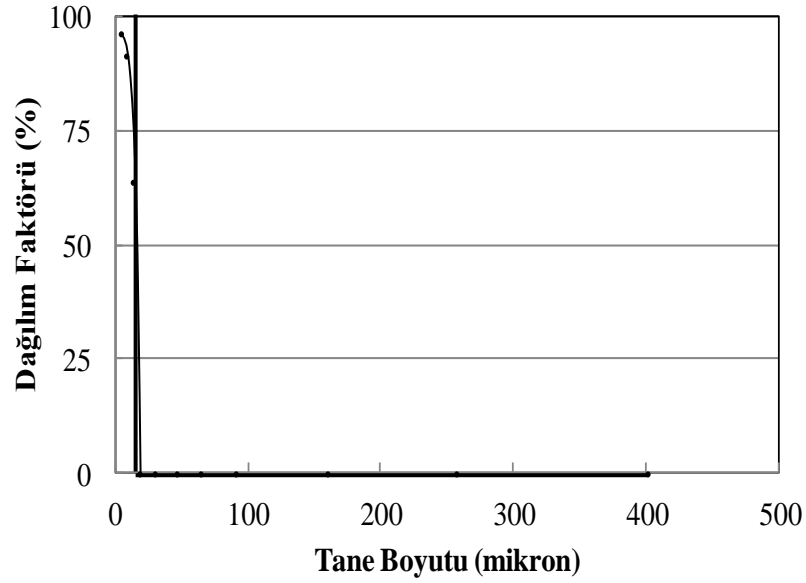
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	1,7	0	0,4	0,0	0,4	0,0
-500+300	3,4	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-300+212	11,6	0	2,8	0,0	2,8	0,0
-212+106	32,4	0	7,8	0,0	7,8	0,0
-106+74	9,5	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-74+53	10,3	0	2,5	0,0	2,5	0,0
-53+38	5,8	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	11,2	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-20+15	3,0	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-15+10	3,0	3,5	0,7	2,7	3,4	78,7
-10+5	3,2	22,5	0,8	17,1	17,9	95,7
-5+2	2,5	48	0,6	36,5	37,1	98,4
-2	2,3	26	0,6	19,8	20,3	97,3
Toplam	100,0	100	24,0	76,0	100,0	



**Şekil A.39** : 31 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.34** : 32 nolu deney için dağılım tablosu.

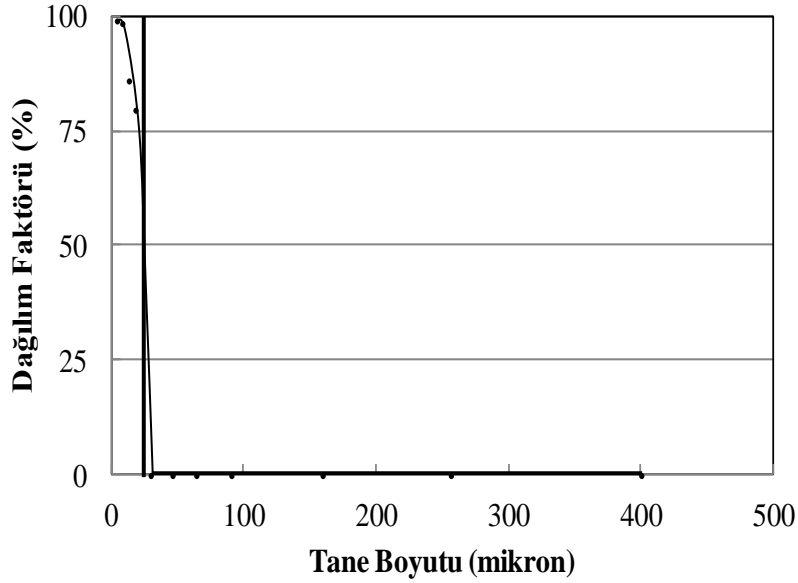
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,5	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-500+300	5,4	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-300+212	12,1	0	4,8	0,0	4,8	0,0
-212+106	29,1	0	11,6	0,0	11,6	0,0
-106+74	9,1	0	3,6	0,0	3,6	0,0
-74+53	9,2	0	3,7	0,0	3,7	0,0
-53+38	5,8	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-38+20	10,8	0	4,3	0,0	4,3	0,0
-20+15	3,0	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-15+10	3,0	3,5	1,2	2,1	3,3	63,9
-10+5	3,7	26,5	1,5	16,0	17,4	91,6
-5+2	2,6	46,5	1,0	28,0	29,1	96,4
-2	2,7	23,5	1,1	14,2	15,2	93,0
Toplam	100,0	100	39,7	60,3	100,0	



**Şekil A.40** : 32 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.35 : 33 nolu deney için dağılım tablosu.**

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,7	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	4,8	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-300+212	13,5	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-212+106	38,4	0	6,7	0,0	6,7	0,0
-106+74	11,3	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-74+53	11,6	0	2,0	0,0	2,0	0,0
-53+38	6,3	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-38+20	4,6	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-20+15	1,8	1,5	0,3	1,2	1,6	79,8
-15+10	1,9	2,5	0,3	2,1	2,4	86,2
-10+5	1,6	26	0,3	21,5	21,8	98,7
-5+2	1,5	45	0,3	37,2	37,4	99,3
-2	0,0	25	0,0	20,7	20,7	100,0
Toplam	100,0	100	17,4	82,6	100,0	

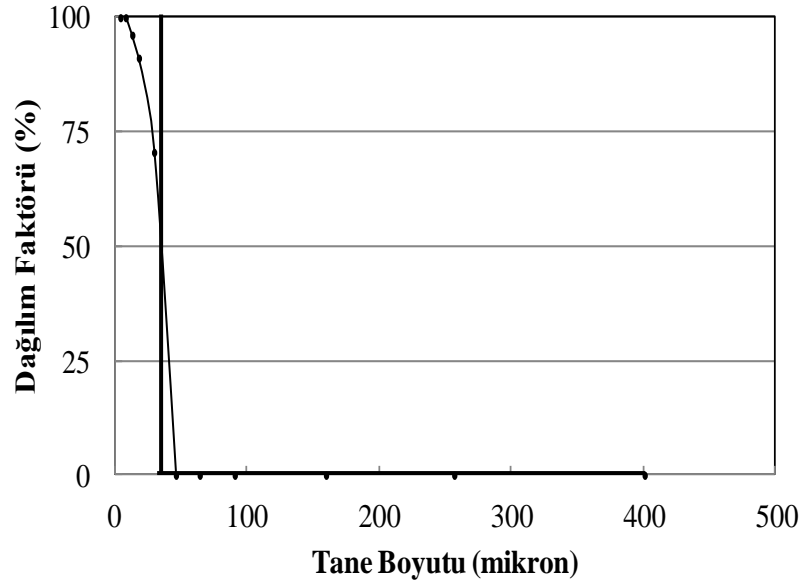


**Şekil A.41 : 33 nolu deney için dağılım eğrisi.**



**Çizelge A.36** : 34 nolu deney için dağılım tablosu.

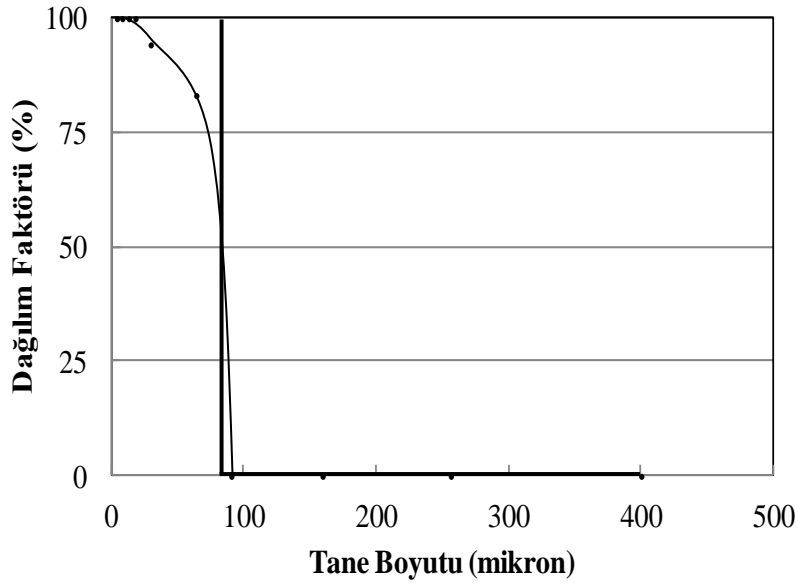
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	6,2	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	7,2	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-300+212	16,2	0	2,9	0,0	2,9	0,0
-212+106	38,2	0	6,8	0,0	6,8	0,0
-106+74	12,1	0	2,1	0,0	2,1	0,0
-74+53	10,3	0	1,8	0,0	1,8	0,0
-53+38	3,9	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-38+20	3,9	2	0,7	1,6	2,3	70,6
-20+15	0,9	2	0,2	1,6	1,8	91,2
-15+10	1,2	6,5	0,2	5,3	5,6	96,2
-10+5	0,0	22,5	0,0	18,5	18,5	100,0
-5+2	0,0	42	0,0	34,6	34,6	100,0
-2	0,0	25	0,0	20,6	20,6	100,0
Toplam	100,0	100	17,7	82,3	100,0	



**Şekil A.42** : 34 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.37** : 35 nolu deney için dağılım tablosu.

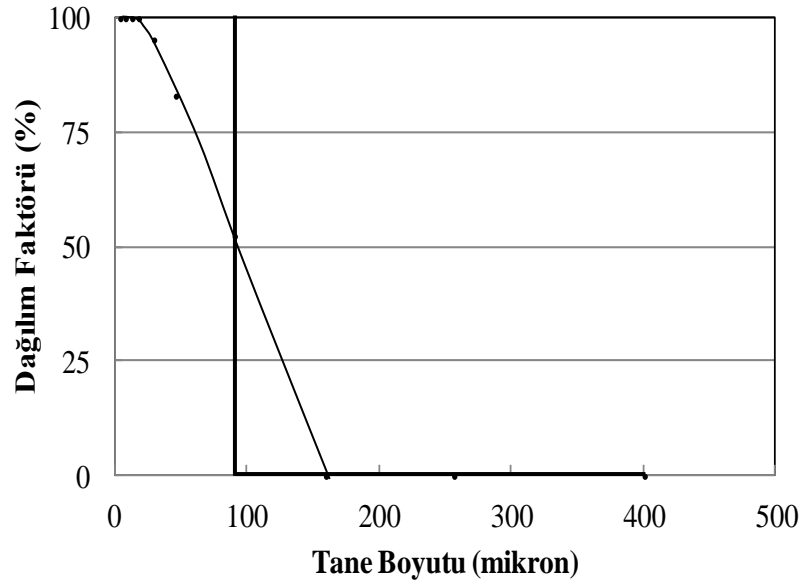
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	5,2	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-500+300	9,8	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-300+212	23,9	0	2,9	0,0	2,9	0,0
-212+106	45,6	0	5,5	0,0	5,5	0,0
-106+74	7,8	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-74+38	5,9	4	0,7	3,5	4,2	83,2
-38+20	1,8	4	0,2	3,5	3,7	94,3
-20+15	0,0	2	0,0	1,8	1,8	100,0
-15+10	0,0	6	0,0	5,3	5,3	100,0
-10+5	0,0	23	0,0	20,2	20,2	100,0
-5+2	0,0	38	0,0	33,4	33,4	100,0
-2	0,0	23	0,0	20,2	20,2	100,0
Toplam	100,1	100	12,0	88,0	100,0	



**Şekil A.43** : 35 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.38** : 36 nolu deney için dağılım tablosu.

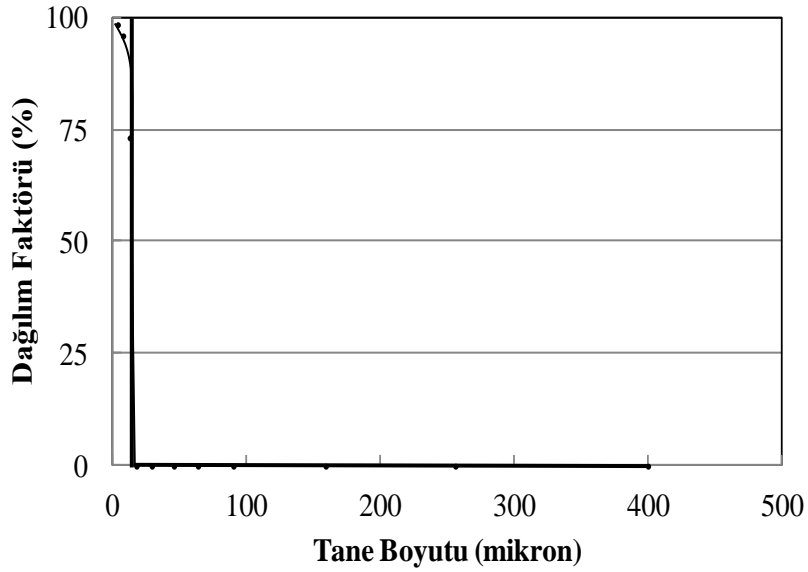
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	7,7	0	1,1	0,0	1,1	0,0
-500+300	10,9	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-300+212	24,2	0	3,5	0,0	3,5	0,0
-212+106	42,7	0	6,1	0,0	6,1	0,0
-106+53	10,9	2	1,6	1,7	3,3	52,4
-53+38	1,2	1	0,2	0,9	1,0	83,1
-38+20	2,3	8	0,3	6,9	7,2	95,3
-20+15	0,0	3	0,0	2,6	2,6	100,0
-15+10	0,0	5	0,0	4,3	4,3	100,0
-10+5	0,0	21	0,0	18,0	18,0	100,0
-5+2	0,0	37	0,0	31,7	31,7	100,0
-2	0,0	23	0,0	19,7	19,7	100,0
Toplam	99,9	100	14,3	85,7	100,0	



**Şekil A.44** : 36 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.39** : 37 nolu deney için dağılım tablosu.

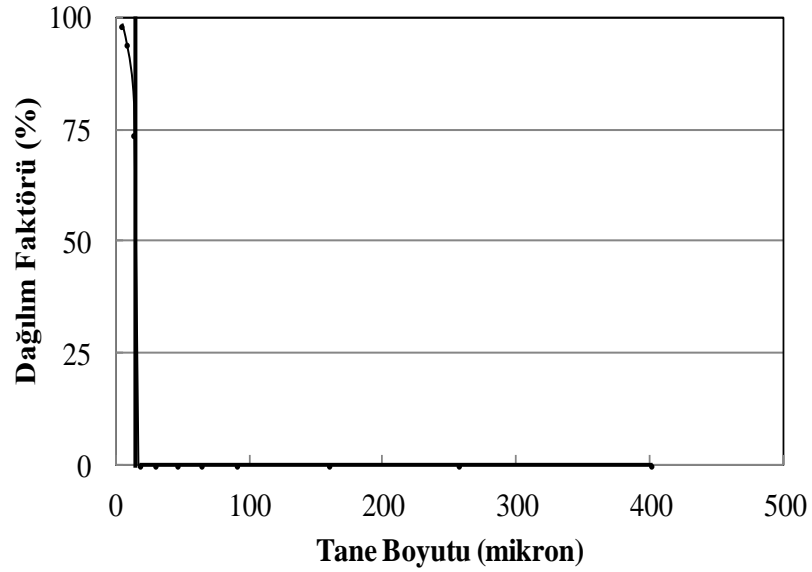
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	6,0	0	1,3	0,0	1,3	0,0
-500+300	6,4	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-300+212	12,9	0	2,8	0,0	2,8	0,0
-212+106	31,0	0	6,8	0,0	6,8	0,0
-106+74	10,2	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-74+53	8,9	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-53+38	6,3	0	1,4	0,0	1,4	0,0
-38+20	8,7	0	1,9	0,0	1,9	0,0
-20+15	2,2	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,6	2	0,6	1,6	2,1	73,4
-10+5	2,4	17	0,5	13,3	13,8	96,2
-5+2	2,4	51	0,5	39,9	40,4	98,7
-2	0,0	30	0,0	23,5	23,5	100,0
Toplam	100,0	100	21,8	78,2	100,0	



**Şekil A.45** : 37 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.40** : 38 nolu deney için dağılım tablosu.

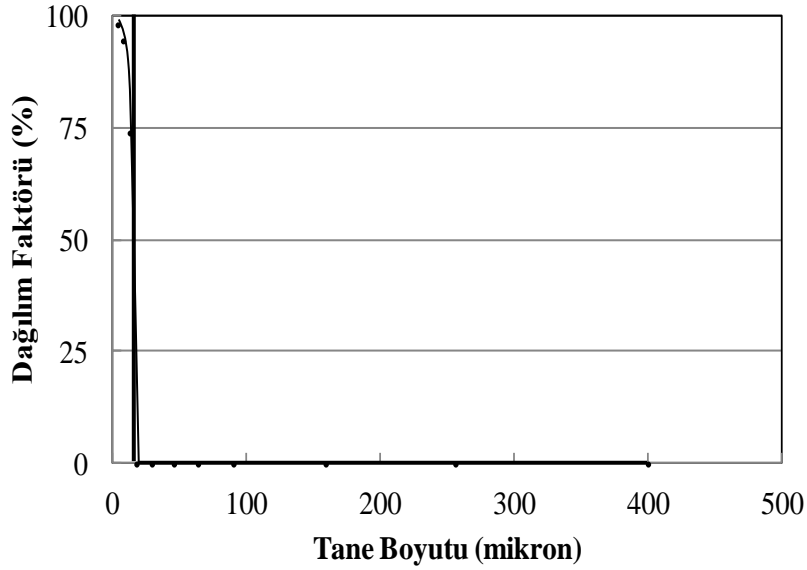
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,0	0	0,7	0,0	0,7	0,0
-500+300	5,1	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-300+212	11,3	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-212+106	29,9	0	7,1	0,0	7,1	0,0
-106+74	9,3	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-74+53	9,5	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-53+38	5,2	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	11,2	0	2,7	0,0	2,7	0,0
-20+15	2,5	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-15+10	3,4	3	0,8	2,3	3,1	73,9
-10+5	3,8	19	0,9	14,5	15,4	94,1
-5+2	2,8	50	0,7	38,1	38,8	98,3
-2	3,0	28	0,7	21,4	22,1	96,8
Toplam	100,0	100	23,7	76,3	100,0	



**Şekil A.46** : 38 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.41** : 39 nolu deney için dağılım tablosu.

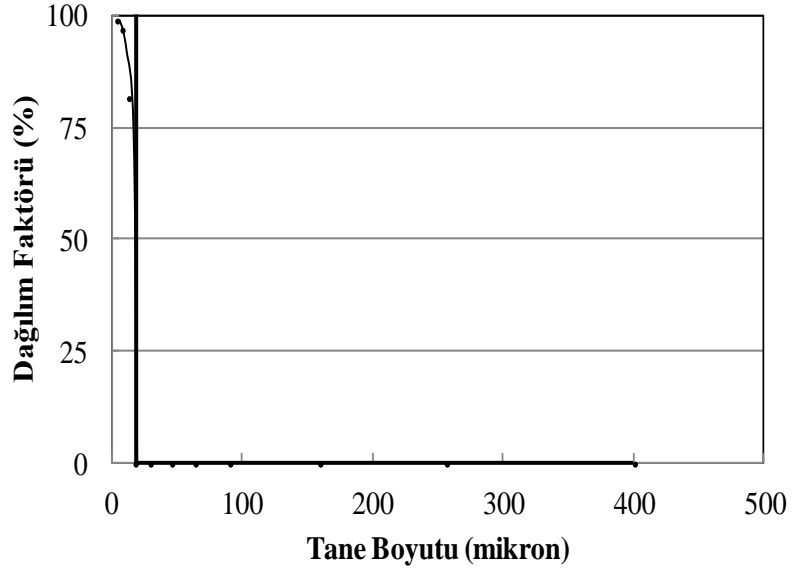
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	2,5	0	0,6	0,0	0,6	0,0
-500+300	4,7	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-300+212	14,5	0	3,8	0,0	3,8	0,0
-212+106	30,7	0	8,0	0,0	8,0	0,0
-106+74	8,5	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-74+53	9,1	0	2,4	0,0	2,4	0,0
-53+38	4,6	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	11,0	0	2,8	0,0	2,8	0,0
-20+15	3,0	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-15+10	3,0	3	0,8	2,2	3,0	74,0
-10+5	3,4	21	0,9	15,5	16,4	94,6
-5+2	2,5	48,5	0,6	35,9	36,6	98,2
-2	2,6	27,5	0,7	20,4	21,0	96,8
Toplam	100,0	100	26,0	74,0	100,0	



**Şekil A.47** : 39 nolu deney için dağılım eğrisi.

**Çizelge A.42 : 40 nolu deney için dağılım tablosu.**

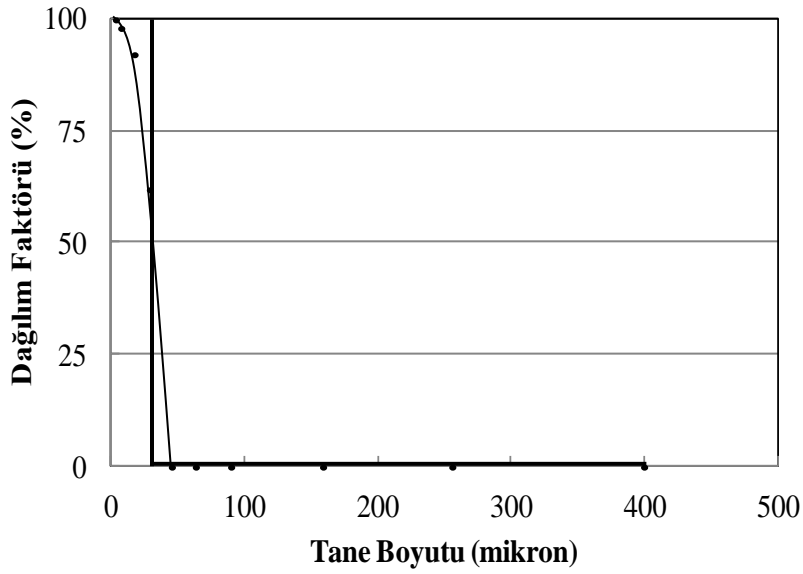
Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,7	0	0,8	0,0	0,8	0,0
-500+300	6,7	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-300+212	13,8	0	3,0	0,0	3,0	0,0
-212+106	34,3	0	7,5	0,0	7,5	0,0
-106+74	10,6	0	2,3	0,0	2,3	0,0
-74+53	10,2	0	2,2	0,0	2,2	0,0
-53+38	5,6	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-38+20	5,5	0	1,2	0,0	1,2	0,0
-20+15	2,1	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-15+10	2,4	3	0,5	2,3	2,9	81,7
-10+5	2,3	21	0,5	16,4	16,9	97,0
-5+2	1,6	48	0,3	37,5	37,9	99,1
-2	1,2	28	0,3	21,9	22,1	98,8
Toplam	100,0	100	21,8	78,2	100,0	



**Şekil A.48 : 40 nolu deney için dağılım eğrisi.**

**Çizelge A.43** : 41 nolu deney için dağılım tablosu.

Boyut Aralığı (mm)	Ağırlık (%)		Beslemeye Göre Ağırlık (%)		Hesapla Besleme (%)	Dağılım Faktörü (%)
	İri Malzeme	İnce Malzeme	İri Malzeme	İnce Malzeme		
+ 500	3,1	0	0,5	0,0	0,5	0,0
-500+300	6,2	0	1,0	0,0	1,0	0,0
-300+212	18,6	0	3,1	0,0	3,1	0,0
-212+106	38,9	0	6,6	0,0	6,6	0,0
-106+74	9,6	0	1,6	0,0	1,6	0,0
-74+53	9,1	0	1,5	0,0	1,5	0,0
-53+38	5,2	0	0,9	0,0	0,9	0,0
-38+20	4,5	1,5	0,8	1,2	2,0	62,0
-20+10	2,7	6,5	0,5	5,4	5,9	92,2
-10+5	2,1	22	0,4	18,3	18,6	98,1
-5+2	0,0	40	0,0	33,2	33,2	100,0
-2	0,0	30	0,0	24,9	24,9	100,0
Toplam	100,0	100	16,9	83,1	100,0	



**Şekil A.49** : 41 nolu deney için dağılım eğrisi.



**Çizelge A.44 :** Yüksek kül içeren kömür zenginleştirme için yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri kullanılarak yapılan optimizasyon

		G	PKO	Boyut	BH	Kül
Isıl Değer	G PKO	100-275	5-15	--	--	--
	G Boyut	100-275	--	212-300	--	--
	G BH	100-200	--	--	0,5-1	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	10-15
	PKO Boyut	--	5-10	150-300	--	--
	PKO BH	--	5-15	--	0,5-1,5	--
	PKO Kİ	--	5-45	--	--	10-20
	Boyut BH	--	--	212-300	0,5-1,0	--
	Boyut Kİ	--	--	38-300	--	10-20
	BH Kİ	--	--	--	0,5-3,5	10-20
Yanabilir Verim	G PKO	100-300	25-45	--	--	--
	G Boyut	100-300	--	38-106	--	--
	G BH	250-300	--	--	2,75-3,5	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	10-25
	PKO Boyut	--	27,5-45	38-106	--	--
	PKO BH	--	25-45	--	1,5-3,5	--
	PKO Kİ	--	22,5-45	--	--	10-20
	Boyut BH	--	--	38-150	2,5-3,5	--
	Boyut Kİ	--	--	38-300	--	10-25
	BH Kİ	--	--	--	0,5-3,5	10-20
Temiz Kömür Verimi	G PKO	100-300	25-45	--	--	--
	G Boyut	100-300	--	38-106	--	--
	G BH	180-300	--	--	2,25-3,5	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	10-20
	PKO Boyut	--	20-45	38-106	--	--
	PKO BH	--	30-45	--	2,5-3,5	--
	PKO Kİ	--	10-45	--	--	10-20
	Boyut BH	--	--	38-106	2,0-3,5	--
	Boyut Kİ	--	--	38-106	--	10-20
	BH Kİ	--	--	--	0,5-3,5	10-20
Kül Uzaklaştırma Oranı	G PKO	100-300	5-15	--	--	--
	G Boyut	--	--	--	--	--
	G BH	100-300	--	--	0,5-1	--
	G Kİ	100-175	--	--	--	35-40
	PKO Boyut	--	5-15	74-300	--	--
	PKO BH	--	5-15	--	0,5-2,5	--
	PKO Kİ	--	5-10	--	--	35,40
	Boyut BH	--	--	106-300	0,5-1	--
	Boyut Kİ	--	--	150-300	--	35-40
	BH Kİ	--	--	--	0,5-1	35-40

**Çizelge A.45 :** Yüksek kükürt içeren kömür zenginleştirme için yanıt yüzeyi ve kontur grafikleri kullanılarak yapılan optimizasyon

		G	PKO	Boyut	BH	Kül
Yanabilir Verim	G PKO	100-300	30-40	--	--	--
	G Boyut	100-300	--	38-106	--	--
	G BH	100-300	--	--	2-3,5	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	2-3
	PKO Boyut	--	20-45	38-106	--	--
	PKO BH	--	25-40	--	0,5-3,5	--
	PKO Kİ	--	25-40	--	--	2-3
	Boyut BH	--	--	38-106	2,5-3,5	--
	Boyut Kİ	--	--	38-106	--	2-3,5
	BH Kİ	--	--	--	0,5-3,5	2-3
Ayrırma Verimi	G PKO	100-300	30-35	--	--	--
	G Boyut	100-300	--	38-106	--	--
	G BH	250-300	--	--	2-3,5	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	2-3
	PKO Boyut	--	20-45	38-150	--	--
	PKO BH	--	20-45	--	0,5-3,5	--
	PKO Kİ	--	25-45	--	--	2-3,5
	Boyut BH	--	--	38-106	1,0-3,5	--
	Boyut Kİ	--	--	38-150	--	2-3,5
	BH Kİ	--	--	--	0,5-3,5	2-3,5
SUO	G PKO	225-300	5-20	--	--	--
	G Boyut	--	--	--	--	--
	G BH	275-300	--	--	1-3	--
	G Kİ	100-300	--	--	--	5-6
	PKO Boyut	--	5-35	150-300	--	--
	PKO BH	--	5-20	--	1,5-2,5	--
	PKO Kİ	--	5-35	--	--	5-6
	Boyut BH	--	--	150-300	1,5-3,5	--
	Boyut Kİ	--	--	106-300	--	5-6
	BH Kİ	--	--	--	0,5-2,75	5-6

## ÖZGEÇMİŞ



**Adı Soyadı:** Ozan KÖKKILIÇ  
**Doğum Yeri ve Yılı:** İstanbul 14.01.1975  
**Adres :** İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü 34469 Ayazağa, İstanbul  
**Telefon:** 0212 2856137  
**Faks:** 0212 285 61 28

## EĞİTİM

**Yüksek Lisans :** **2000-2003** İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher-Kömür Hazırlama ve Değerlendirme Programı  
**Lisans :** **1994-2000** İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

## YAYINLAR

### A. HAKEMLİ DERGİLER

1. Burat, F., **Kökkılıç. O.**, Kangal, O., Gürkan, V., Çelik, M.S., 2007. Quartz-Feldspar Separation for Glass and Ceramic Industry, *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 24, Issue 2, pages 75-80, May.
2. Acarkan, N., Hundemir, O.B., **Kökkılıç O.**, Sirkeci A.A., Özer M., 2008. A Study on Settling of Tincal Mineral Particles in Different Media, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, Volume 29, Issue 2, pp. 98 – 103, April.
3. Kangal, O., **Kökkılıç, O.**, Burat, F., 2009. Production of huntite and hydromagnesite with flame retardant featured by flotation, *Minerals & Metallurgical Processing*, Vol. 26, No 2, pages 109-113, May.
4. Acarkan, N., Bulut, G., Gül, A., Kangal, O., Karakaş, F., **Kökkılıç, O.**, Önal, G., 2011. The Effect of Collector's Type on Gold and Silver Flotation in a Complex Ore, *Separation Science and Technology*, Volume 46, Issue 2, pp. 283-289, January.

## B. BİLDİRİLER

### ULUSLARARASI BİLDİRİLER

1. Kökkılıç, O., Acarkan, N., Kangal, O., Sirkeci, A. A., 2004. Recovery of Boron from the Waste Waters of Kırka Borax Concentrator, Proceeding of the 10th International Mineral Processing Symposium, İzmir, Çeşme, 5-7 October, pp. 781-785.
2. Kökkılıç, O., Sirkeci, A. A., Acarkan, N., 2005. Removal of Boron from the Effluents of Kırka Borax Tailing Ponds, Proceedings of Mineral Processing Technology (MPT 2005), January 6-8, Dhanbad-India,.
3. Burat, F., Kökkılıç, O., Kangal, O., Gürkan, V., Çelik, M.S., 2005. Quartz-feldspar separation for glass and ceramic industry, Processing of Industrial Minerals '05, UK.
4. Acarkan, N., Hundemir, O. B., Kökkılıç, O., Sirkeci, A. A., Özer, M., 2005. Behaviour of tinal minerals in different fluid media, Processing of Industrial Minerals '05, UK
5. Acarkan, N., Şaroglu, T., Kökkılıç, O., 2006. Beneficiation of colemanite tailings, XXIII. International Mineral Processing Congress, 3-8 September, İstanbul, Turkey, pp. 2225-2229.
6. Yüce, A.E., Kangal, O., Özer, M., Kökkılıç, O., Güney, A., Önal, G., 2007. Evaluation Of Coal Fines from Tailings, Book of Proceedings, XII Balkan Mineral Processing Congress, 10-14 June, Delphi, Greece, pp. 347-352
7. Yüce, A.E., Kangal, O., Özer, M., Kökkılıç, O., Güney, A., Önal, G., 2007. The comparison of MGS and Knelson Concentrator in the fine coal beneficiation, Book of Proceedings, XII Balkan Mineral Processing Congress, 10-14 June, Delphi, Greece, pp. 347-352
8. Önal, G., Özer, M., Yüce, A.E., Kökkılıç, O., Kangal, O., Güney, A., 2007. The advanced monitoring method to beneficiation of coal fines from Soma, Twenty-Fourth Annual International Pittsburgh Coal Conference, September 10-14, Johannesburg, South Africa.
9. Kökkılıç O., Boylu F., Uluşahin B., Dinçer H., 2008. Multistage Hydrocycloning Of Clayey Colemanite Tailings (Inactive Dam Wastes), XXIV. International Mineral Processing Congress, 24-28 September, Beijing, China, pp.3551-3559.
10. Yüce, A.E., Kangal, M.O., Kökkılıç, O., Güney, A., Gürkan, V., 2009. Recovery Of Gold Bearing Ores By Gravity And Flotation Techniques, XIII Balkan Mineral Processing Congress, June Romania, pp. 438-444.
11. Güney, A., Yüce, A.E., Kangal, M.O., Burat, F., Kökkılıç, O., Gürkan, V., 2009. Beneficiation and process flow sheet development of chromites ores, XIII Balkan Mineral Processing Congress 2009, June, Romania, pp. 401-408.
12. Acarkan, N., Bulut, G., Gül, A., Kangal, M.O., Karakaş, F., Kökkılıç, O., Önal, G., 2009. Au-Ag Recovery with Flotation from Complex Ores, XIII Balkan Mineral Processing Congress, June Romania, pp. 172-177.
13. Önal, G., Yüce, A. E., Kangal, O., Özer, M., Kökkılıç, O., Güney, A., 2009. Comparison of Spiral and MGS for Recovery of Fine Coal From Slimes, 26th

Annual International Pittsburg Coal Conference–Coal, Energy, Environment and Sustainable Development, Session 11, Coal Science: Coal Beneficiation-I, September 20–23, Pittsburg, PA, USA.

14. Yüce, E., Güney, A., Önal, G., Kangal, O., Kökkılıç, O., Özer, M., Özdingiş, M., 2010. Fine Coal Evaluation by Gravity Methods, 25th International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010 Proceedings, 6-10 September, Brisbane, Qld, Australia, pp. 1429-1435.
15. Kökkılıç, O., Burat, F., Güney, A., Kangal, O., 2011. Beneficiation of Huntite Ores by Attrition and Classification,, Konferens i Mineralteknik, Conference in Minerals Engineering, 8-9 February, Lulea, Sweden, 139-153

## ULUSAL BİLDİRİLER

1. Kurşun, İ., Acarkan, N., **Kökkılıç, O.**, 2005. Manyetik Ayırmayla İle Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesinde Son Gelişmeler, *Türkiye Demir Yatakları Jeolojisi, Madenciliği ve Mevcut Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 23-25 Haziran, İstanbul, pp 331-345.
2. Yüce, A. E., Güney, A., Erekli, B., **Kökkılıç, O.**, Acarkan, N., Önal, G., Demirci, A., 2005. Hasaңcelebi Demir Yatağının Revize Fizibilitesi, *Türkiye Demir Yatakları Jeolojisi, Madenciliği ve Mevcut Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 23-25 Haziran, İstanbul, pp. 304-317.
3. Ateşok, G., Acarkan, N., Güney, A., Gül, A., Kangal, O., **Kökkılıç, O.**, 2005. Zonguldak Merkez Lavvarının Performans Etüdü ve Kozlu-Üzülmez Bölgesi Kömürlerinin Kullanım Teknolojilerine Yönelik Zenginleştirme Özelliklerinin Tesbiti, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, 09-12 Haziran, İzmir, Türkiye, pp.335-345.
4. Ateşok, G., Güney, A., Acarkan, N., Gül, A., Kangal, M. O., **Kökkılıç, O.**, 2006. Zonguldak Merkez Lavvarı ve Yeni Lavvar Alternatifleri,, *Türkiye 15. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, Türkiye, 07-09 Haziran, Sayfa: 345-353.
5. Güney, A., Yüce, A. E., Kangal, O., Özer, M., **Kökkılıç, O.**, 2010. Kömür şamlarının Değerlendirilmesi, *Türkiye 17. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, 02-04 Haziran, Zonguldak, Türkiye, Editörler: Kenan ÇOLAK, Hamit AYDIN, Sayfa: 87-96.

## C. ALDIĞI ÖDÜLLER

1. "Türkiye Huntit Cevherleri ve Zenginleştirme Olanakları" isimli proje ile Mehmet Kemal Dedeman Araştırma ve Geliştirme Proje Yarışması 2009 Yılı "Madencilik Sektörü" Birincilik Ödülü

