

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK İŞLETMELERDE
OPTİMUM ÜRETİM PLANLAMASINDA
YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Murat ÖZKAN

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AÇIK İŞLETMELERDE
OPTİMUM ÜRETİM PLANLAMASINDA
YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Murat ÖZKAN
(505062004)**

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selamet G. ERÇELEBİ

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505062004 numaralı Doktora Öğrencisi **Murat ÖZKAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AÇIK İŞLETMELERDE OPTİMUM ÜRETİM PLANLAMASINDA YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Selamet G. ERÇELEBİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. S. Erkin NASUF**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kaan ERARSLAN
Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. C. Atilla ÖZTÜRK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **15 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu doktora tezi başta olmak üzere, mesleki hayatım boyunca tüm bilgi, deneyim ve olumlu yöndeki eleştirilerini benden esirgemeyen, her konuda çalışmalarına destek veren danışman hocam Prof. Dr. Selamet G. Erçelebi'ye;

Değerli görüş ve önerilerinden dolayı saygıdeğer hocam Prof. Dr. S. Erkin Nasuf'a;

Her türlü bilgi ve tecrübesini benimle paylaşmaktan çekinmeyen, sorduğu sorularla bana ılık tutan değerli hocam Prof. Dr. Kaan Erarslan'a;

Çalışmalarım konusunda beni yüreklendiren ve desteğini her zaman hissettiğim saygıdeğer hocam Doç. Dr. C. Atilla Öztürk'e;

Tez jürisinde bulunan ve önerileriyle bana destek olan Sayın Prof. Dr. Ataç Başçetin'e;

Zor zamanlarımda yeni zorluklarla karşılaşmamam için seferber olan bölüm başkanımız Prof. Dr. Orhan Kural ve yardımcısı Doç. Dr. Abdullah Fişne başta olmak üzere İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm hocalarıma;

Birçok duyguyu beraber paylaştığımız, gece yarısına kadar süren çalışmalarda beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşlarım Mikail Başyigit ve Samet Can Özer ayrıca desteklerini esirgemeyen araştırma görevlisi çalışma arkadaşlarım Ozan Bayram, Erim Güçlü, Emre Avunduk, Ramazan Çomaklı, Aydın Shaterpour Mamaghani, Olgun Esen, Melis Toker, Özge Akyıldız ve Taşkın Deniz Yıldız'a;

Micromine programının temini ve kullanımı konusunda verdiği desteklerden dolayı Sayın Gani Eşiyok'a;

Ailesiyle beraber hayatımın her aşamasında desteğini hissettiğim, zorluklara ve sıkıntılara beraber katlandığımız, tezimin tamamlanmasında pek çok desteği olan ve benim için çok değerli olan arkadaşım İ. Emre Önsel, muhterem eşi Nisa Önsel, oğlu Alper Önsel ve babası Prof. Dr. Çetin Önsel'e;

Hayatımın her anında maddi-manevi desteğini ve de anlayışlarını esirgemeyen, bıkmadan usanmadan her türlü imkânı sağlayan, kendi hayatlarından fedakârlık edip benim için çabalayan sevgili annem, babam, kardeşlerim ve de eşime;

Teşekkür ederim.
İyi ki varsınız.

Mayıs 2015

Murat ÖZKAN
Maden Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Açık İşletmelerde Üretim Planlaması ve Önemi.....	1
1.2 Literatür Özeti	3
1.2.1 Açık ocak nihai sınırlarını belirleyen yöntemler.....	3
1.2.2 Açık ocak nihai sınırlarının bulunmasından sonra yapılan üretim sıralaması	6
1.2.3 Açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasını eş zamanlı olarak belirleyen yöntemler	9
1.3 Açık İşletmelerde Uzun Vadeli Üretim Planlaması Problemi	13
1.4 Tezin Amacı	14
1.5 Yöntem	15
2. AÇIK İŞLETMELERDE UZUN VADELİ ÜRETİM PLANLAMASI.....	17
2.1 Genel Bilgiler	19
2.1.1 Blok model	19
2.1.2 Blokların ekonomik değeri.....	21
2.1.3 Net bugünkü değer ve nakit akışı.....	23
2.1.4 İç içe ocaklar serisi ve faz tasarımı	25
2.2 Açık İşletmelerde Nihai Sınırların Belirlenmesi	26
2.2.1 Hareketli koni yöntemi.....	27
2.2.2 Dinamik programlama	29
2.2.3 Maksimum akış algoritması	31
2.2.4 Grafik teorisi	32
2.2.5 Mevcut çalışmaların değerlendirilmesi	33
2.3 Açık İşletmelerde Üretim Planlamasının Uygulanması	34
2.3.1 Üretim planlaması için kullanılan matematiksel modeller	34
2.3.1.1 Doğrusal programlama.....	35
2.3.1.2 Karışık tamsayı programlama	37
2.3.1.3 Tamsayı programlama.....	39
2.3.1.4 Dinamik programlama	41
2.3.2 Açık işletmelerde üretim planlamasına yönelik çözüm yöntemleri.....	42
2.3.2.1 Dinamik programlama ile çözüm.....	42
a) Roman yaklaşımı.....	42
b) Dowd ve Onur yaklaşımı	43
c) Erarslan ve Çelebi yaklaşımı.....	43

2.3.2.2 Parametrik analiz (parameterization)	46
a) Whittle yaklaşımı	47
b) Rezerv parametreleştirme	53
c) Lagranj gevşetme yaklaşımı (Lagrange relaxation approach)	54
2.3.2.3 Konumsal ağırlık yaklaşımı (positional weight)	55
a) Gershon yaklaşımı	55
b) Wang ve Sevim yaklaşımı	57
2.3.2.4 Kümeleme yöntemi (clustering approach/fundamental tree)	64
2.3.2.5 Dal-Kesme yöntemi (branch and cut)	66
2.3.2.6 Benzetimli tavlama (simulated annealing)	67
2.3.2.7 Genetik algoritma	67
3. YÖNTEM.....	69
3.1 Yöntemin Genel Özellikleri	69
3.2 Yöntemde Kullanılacak Olan Bazı Kavramlar	70
3.2.1 Net bugünkü değer, önemi ve maksimizasyonu	70
3.2.2 Birim kazı başına düşen kazanç ve NBD maksimizasyonu ilişkisi	71
3.2.2.1 Değerli cevherin öncelikli olarak elde edilmesi	71
3.2.2.2 t dönemindeki kazancın maksimize edilmesi	72
3.2.3 Birim blok kazısı başına düşen ekonomik değer (BEVPB)	73
3.2.4 Hareketli koni analizi ve arama konisi	74
3.2.5 Negatif koni ve blok kümesi optimizasyonu	75
3.2.6 Pozitif arama konisi tabanının genişletilmesi	78
3.3 Gelişmiş hareketli koni yönteminin adımları	81
3.4 Yöntemin Bir Örnek Üzerinde Uygulanması	83
3.4.1 Blok ekonomik değerlerinin (BEV) girilmesi	83
3.4.2 Birim kazı başına düşen ekonomik değer (BEVPB) hesaplanması	84
3.4.3 Blok kümesi optimizasyonu	86
3.4.4 Yıllık üretim kapasitesi kısıtının hesaba katılması	86
3.4.5 Örnek problemin çözümüne başlangıç	88
3.4.6 Arama konisinin tabanının genişletilmesi ve iterasyonların sonu	96
3.4.7 Açık ocak nihai sınırlarının tespiti	97
3.4.8 Yıllara göre kazı planlaması ve blokların gruplandırılması	98
3.4.9 Nihai sınır tespiti sonucunun yorumlanması	100
3.5 Yöntemin 2B Bir Örnek Üzerinde Test Edilmesi	101
3.5.1 Açık ocak nihai sınırlarını bulma kabiliyetinin test edilmesi	102
3.5.2 Yöntemin üretim sıralaması kabiliyetinin test edilmesi	104
3.6 Gelişmiş Hareketli Koni Algoritması Yazılımı	109
4. ÖRNEK BİR SAHA ÜZERİNDE YÖNTEMİN UYGULANMASI.....	113
4.1 Sahanın ve Maden Yatağının Tanıtılması	113
4.2 Blok Model Özellikleri	115
4.3 Cevher Tenör Değerlerinin Kestirimi	116
4.4 Blok Ekonomik Değerlerinin Hesaplanması	118
4.5 İç İç Ocaklar Serisi Yöntemi ile Üretim Planlaması (Whittle)	118
4.5.1 Lerchs ve Grossmann algoritması ile nihai sınırların bulunması	119
4.5.2 İç içe ocaklar serisi ile üretim sıralamasının elde edilmesi	122
4.6 Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi İle Üretim Planlamasının Yapılması	131
4.7 Sonuçların Değerlendirilmesi	138
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR.....	151
ÖZGEÇMİŞ.....	157

KISALTMALAR

2B	: 2 Boyutlu
3B	: 3 Boyutlu
LG	: Lerchs ve Grossmann
LGA	: Lerchs ve Grossmann Algoritması
NPV	: Net Present Value
NBD	: Net Bugünkü Değer
FT	: Temel Ağaç (Fundamental Tree)
FTA	: Temel Ağaç Algoritması (Fundamental Tree Algorithm)
LP	: Doğrusal Programlama (Linear Programming)
IP	: Tamsayı Programlama (Integer Programming)
MIP	: Karışık Tamsayı Programlama (Mixed Integer Programming)
DP	: Dinamik Programlama (Dynamic Programming)
RAF	: Gelir Ayarlama Faktörü (Revenue Adjustment Factor)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Basit bir nakit akışı örneği (Stermole ve Stermole, 1974).	24
Çizelge 2.2 : Sezgisel yöntem ve Rezerv Parametreleştirme yöntemi sonuçları.....	62
Çizelge 3.1 : İki kazı alternatifi için faz değerleri ve NBD değişimi.	71
Çizelge 3.2 : Nihai sınırlar içerisinde kalan bloklar.	98
Çizelge 3.3 : Yıllık üretim miktarına göre kazılacak bloklar ve NBD.	100
Çizelge 3.4 : Örnek üzerinde farklı yöntemlerle bulunmuş nihai sınır sonuçları....	101
Çizelge 3.5 : Geliştirilen yöntemin diğer yöntemler ile karşılaştırılması.....	104
Çizelge 3.6 : Sezgisel yöntem ile elde edilen 5 faz ve verileri.	106
Çizelge 3.7 : Gelişmiş hareketli koni ile elde edilen 5 faz ve verileri.	108
Çizelge 3.8 : İki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması.	109
Çizelge 4.1 : Blok model boyutları ve koordinatları.	115
Çizelge 4.2 : Açık işletme gelir ve giderleri.	118
Çizelge 4.3 : LG algoritması ile elde edilen sonuçlar.....	119
Çizelge 4.4 : İç içe ocaklar serisi raporu (kısaltılmış).	125
Çizelge 4.5 : En iyi durum senaryosu analiz sonuçları.....	128
Çizelge 4.6 : En kötü durum senaryosu analiz sonuçları.....	129
Çizelge 4.7 : Sabit ilerleme senaryosu analiz sonuçları.	129
Çizelge 4.8 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretim miktarları.	136
Çizelge 4.9 : Yıllık cevher ihtiyacına göre üretim miktarları ve kümülatif kazanç.	137
Çizelge 4.10 : Sonuçların karşılaştırılması.	138
Çizelge 4.11 : Üretim miktarı ve NBD sonuçlarının karşılaştırılması.....	143

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Örnek bir 3B blok model.....	19
Şekil 2.2 : Blok kısıtlamaları için 1-9 ve 1-5 modellerinin temsili görünümü.	20
Şekil 2.3 : Blok modelde kullanılan ana blok ve alt bloklar.....	21
Şekil 2.4 : İç içe ocaklar serisi.	26
Şekil 2.5 : Dönemlik üretim miktarına göre düzenlenmiş faz tasarımı.	26
Şekil 2.6 : Hareketli koni yönteminin akış şeması.	28
Şekil 2.7 : Lerchs ve Grossmann dinamik programlama algoritması.....	30
Şekil 2.8 : Temsili bir maksimum akış algoritması.	32
Şekil 2.9 : Grafik teorisinde maksimum kapanım.	33
Şekil 2.10 : Kısmi blok kazısı problemi.	37
Şekil 2.11 : Dinamik programlama yöntemi grafiksel gösterimi.	42
Şekil 2.12 : Simülatif optimizasyon sisteminin şeması.	45
Şekil 2.13 : Whittle yöntemi ile belirlenmiş nihai ocak sınırı.	48
Şekil 2.14 : Whittle yöntemi ile oluşturulan iç içe ocaklar serisi.	49
Şekil 2.15 : En İyi Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.....	51
Şekil 2.16 : En Kötü Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.	51
Şekil 2.17 : Sabit İlerleme Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.....	52
Şekil 2.18 : Ters koni (Gershon, 1987).	56
Şekil 2.19 : Wang ve Sevim yöntemi adımları-1 (Wang ve Sevim, 1992).	59
Şekil 2.20 : Wang ve Sevim yöntemi adımları-2 (Wang ve Sevim, 1992).	60
Şekil 2.21 : Rezerv Parametreleştirme ile Ortalama Tenör–Toplam Blok grafiği. ...	63
Şekil 2.22 : Rezerv Parametreleştirme ile Cevher Blokları–Toplam Blok grafiği. ...	63
Şekil 2.23 : Bir FT algoritmasının adımları (Ramazan ve diğ., 2005).	65
Şekil 2.24 : Bir Fundamental Tree örneği ve çözümü (Ramazan ve diğ. 2005).....	66
Şekil 2.25 : Üretim planlamasında Genetik Algoritma yönteminin adımları.....	68
Şekil 3.1 : İki farklı kazı alternatifi.....	70
Şekil 3.2 : Blok model kesiti.	73
Şekil 3.3 : 3I bloğunun oluşturduğu koni içerisinde kalan bloklar.....	73
Şekil 3.4 : 4G bloğunun oluşturduğu koni içerisinde kalan bloklar.	73
Şekil 3.5 : Temsili 2B arama konisi.....	75
Şekil 3.6 : Temsili 3B arama konisi.....	75
Şekil 3.7 : 4F bloğundaki arama konisi.	75
Şekil 3.8 : 4F bloğunun oluşturduğu blok kümesi.....	76
Şekil 3.9 : Negatif arama konisi.	76
Şekil 3.10 : Negatif arama konisi 2.adım.	77
Şekil 3.11 : Negatif arama konisi 3.adım.	77
Şekil 3.12 : 4F konisinin optimize edilmiş hali.	78
Şekil 3.13 : Hareketli koni hatası için örnek.	79
Şekil 3.14 : 3D bloğunun oluşturduğu koni.....	80
Şekil 3.15 : 3D bloğunun oluşturduğu genişletilmiş koni.	80

Şekil 3.16 : 3D blok kümesinin içerisinde kalan bloklar.	80
Şekil 3.17 : 3D blok kümesinin optimize edilmiş hali.	80
Şekil 3.18 : Yöntemin akış şeması.	82
Şekil 3.19 : Örnek blok model ekonomik değerleri (BEV).	83
Şekil 3.20 : Her bir bloğun oluşturduğu blok kümesinin toplam değeri (TBEV).	83
Şekil 3.21 : Blok kümelerindeki toplam blok sayıları (TBN).	84
Şekil 3.22 : Birim kazı başına düşen ekonomik değerler (BEVPB).	85
Şekil 3.23 : Yıllık üretim kapasitesinin entegre edilmesi.	87
Şekil 3.24 : Örnek uygulama başlangıç durumu.	88
Şekil 3.25 : Örnek uygulama 1.adım.	89
Şekil 3.26 : Örnek uygulama 2.adım.	90
Şekil 3.27 : Örnek uygulama 3.adım.	90
Şekil 3.28 : 3I blok kümesinin optimizasyonu.	91
Şekil 3.29 : Örnek uygulama 4.adım.	91
Şekil 3.30 : 3F blok kümesinin optimizasyonu.	92
Şekil 3.31 : Örnek uygulama 5.adım.	92
Şekil 3.32 : Örnek uygulama 6.adım.	93
Şekil 3.33 : 4H blok kümesinin optimizasyonu.	93
Şekil 3.34 : Örnek uygulama 7.adım.	94
Şekil 3.35 : Örnek uygulama 8.adım.	94
Şekil 3.36 : Örnek uygulama 9.adım.	95
Şekil 3.37 : 5F blok kümesinin optimizasyonu.	95
Şekil 3.38 : Örnek uygulama 10.adım.	96
Şekil 3.39 : Koni tabanının genişletilmesi.	97
Şekil 3.40 : Örnek problem için açık ocak nihai sınırları.	98
Şekil 3.41 : Yıllara göre kazı planı.	99
Şekil 3.42 : LG algoritması ile bulunan nihai sınırlar.	100
Şekil 3.43 : Hareketli koni yöntemi ile bulunan nihai sınırlar.	101
Şekil 3.44 : Korobov algoritması ile bulunan nihai sınırlar.	101
Şekil 3.45 : 500 blok içeren blok model örneği.	102
Şekil 3.46 : 500 blok içeren blok model örneği ekonomik değerleri.	102
Şekil 3.47 : LG algoritması ile bulunan nihai ocak sınırları.	102
Şekil 3.48 : Korobov algoritması ile bulunan nihai ocak sınırları.	103
Şekil 3.49 : Hareketli koni yöntemi ile bulunan nihai ocak sınırları.	103
Şekil 3.50 : Gelişmiş hareketli koni yöntemi ile bulunan nihai ocak sınırları.	103
Şekil 3.51 : Sezgisel yöntem ile yapılan üretim sıralaması sonuçları.	105
Şekil 3.52 : Sezgisel yöntem ile elde edilen 5 faz.	105
Şekil 3.53 : Her fazda elde edilen blok sayıları ve NBD (Wang&Sevim).	106
Şekil 3.54 : Hareketli koni analizi ile yapılan üretim sıralaması.	107
Şekil 3.55 : Hareketli koni analizi ile elde edilen 5 faz.	107
Şekil 3.56 : Gelişmiş hareketli koni ile her fazdaki Blok Sayısı ve NBD grafiği. ..	108
Şekil 3.57 : Programın genel görünümü.	109
Şekil 3.58 : Programda 3B blok modelin görülebileceği pencere.	110
Şekil 3.59 : Programdan elde edilen log dosyası örneği.	111
Şekil 3.60 : Programdan elde edilen işlenmiş blok model dosyası örneği.	111
Şekil 4.1 : Örnek uygulamada kullanılan sondajlar (Plan görünüm).	114
Şekil 4.2 : Sondajlar ve topoğrafya (Plan görünüm)	114
Şekil 4.3 : Cevher ve topoğrafya (GD görünümü).	115
Şekil 4.4 : Blok model (GD görünümü).	116
Şekil 4.5 : Blok model ve cevher katı modeli (GD görünümü).	116

Şekil 4.6 : Tenör değerleri atanmış cevher blokları (Plan görünüm).	117
Şekil 4.7 : Tenör değerleri atanmış cevher blokları (GD görünümü).....	117
Şekil 4.8 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (Plan görünüm).....	120
Şekil 4.9 : 10900N ve 2610E kesit yerleri (Plan görünüm).....	120
Şekil 4.10 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (10900N kesiti).....	121
Şekil 4.11 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (2610E kesiti).	121
Şekil 4.12 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (GD görünümü).	122
Şekil 4.13 : İç içe ocaklar serisi (Plan görünüm).....	123
Şekil 4.14 : İç içe ocaklar serisi (GD görünümü).	123
Şekil 4.15 : İç içe ocaklar serisi (10900N kesiti).....	124
Şekil 4.16 : İç içe ocaklar serisi (2610E kesiti).	124
Şekil 4.17 : Gelir Ayarlama Faktörü – Üretim Miktarı grafiği.....	126
Şekil 4.18 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (Plan görünüm).	126
Şekil 4.19 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (GD görünümü).....	127
Şekil 4.20 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (10900N kesiti).	127
Şekil 4.21 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (2610E kesiti).....	127
Şekil 4.22 : Yıllık üretim miktarları ve üç farklı senaryoya göre NBD.	130
Şekil 4.23 : Kullanılan bilgisayar ve işletim sistemi özellikleri.	131
Şekil 4.24 : İterasyonların sonunda programın görünümü.	132
Şekil 4.25 : Gelişmiş hareketli koni iterasyonları ve blok sayıları.	132
Şekil 4.26 : İterasyonlar ve BEVPB değerleri.	133
Şekil 4.27 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (Plan görünüm).	134
Şekil 4.28 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (GD görünümü).....	134
Şekil 4.29 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (10900N kesiti).	135
Şekil 4.30 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (2610E kesiti).....	135
Şekil 4.31 : Yıllık üretim miktarları ve NBD grafiği.	136
Şekil 4.32 : Yıllık cevher ihtiyacına göre üretim miktarları ve kümülatif kazanç. .	137
Şekil 4.33 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (Plan görünüm).	139
Şekil 4.34 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (GD görünümü).	140
Şekil 4.35 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (10900N kesiti).	141
Şekil 4.36 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (2610E kesiti).....	142
Şekil 4.37 : Üretim miktarı ve NBD sonuçlarının karşılaştırılması.....	143

AÇIK İŞLETMELERDE OPTİMUM ÜRETİM PLANLAMASINDA YENİ BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması; ocağın başlangıcından ömrünün sonuna kadar süren, bu süreç içerisinde optimize edilmesi ve karar verilmesi gereken birçok değişkeni olan bir planlama sürecidir. Üretim planlamasının ana amacı, fiziksel ve ekonomik koşullar altında ocaktan elde edilecek ekonomik değerin maksimize edilmesidir. Ekonomik değerin maksimizasyonunun belirlenmesinde ise açık ocağın nihai sınırları ve üretim sıralaması oldukça etkilidir.

Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesi, kazancı maksimize etmek amacıyla yapılan önemli bir optimizasyon işlemidir. Bu adımın esas amacı, açık ocak nihai sınırlarının iskontosuz kazancın maksimize edildiği yere kadar getirilmesidir. Nihai sınırları belirleme konusunda en güvenilir yöntemler Lerchs-Grossmann algoritması ile Maksimum Akış algoritmasıdır. Hareketli Koni yöntemi ise hızlı olması, kolay anlaşılması ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilebilmektedir.

Açık ocak işletmelerinde üretim sıralaması veya kazı sıralaması ise hangi malzemenin ne zaman kazılacağı ile ilgilidir. Üretim sıralaması optimize edilirken, ocaktan elde edilen net bugünkü değerin (NBD) diğer bir deyişle iskontolu kazancın maksimize edilmesi için uğraşılır. Üretim sıralamasında net bugünkü değerin maksimize edilmeye çalışılmasının nedeni, ekonomik değişkenlerin zamana göre değişiyor olması yani paranın zaman değeridir. Üretim sıralamasının optimize edilmesi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem parametreleştirme tekniği ile elde edilen iç içe ocaklar serisinin oluşturulmasıdır.

Açık ocak işletmelerinde üretim planlamasının optimizasyonu amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle, açık ocak nihai sınırları öncelikli olarak tespit edilmekte ve daha sonra bu sınırlar içerisinde üretim sıralaması yapılmaktadır. Ancak, nihai sınırlar elde edilirken kullanılan blok ekonomik değerlerinin şimdiki zamana göre alınması ve bu blokların gerçekte çıkarılacağı zamandaki değerlerinin hesaba katılmaması nedeniyle bu sınırların gerçekten de optimum olduğu tartışma konusudur. Bu nedenle araştırmacılar, açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasını eş zamanlı olarak optimize edebilen yöntemlerin geliştirilmesi için uğraşmaktadırlar. Bu yöntemlerde; hangi malzemenin hangi zamanda çıkarılacağı belli olduğundan dolayı, çıkarılış zamanına göre ekonomik değerler verilebilmektedir. Bu durumda paranın zaman değeri de hesaba katılmış olur.

Bu doktora tezi kapsamında, açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalara alternatif olabilecek bir algoritma geliştirilmiştir. Tezin amacı, açık ocaklarda net bugünkü değerin maksimizasyonunu sağlayacak üretim sıralamasının elde edilmesi ve aynı zamanda açık ocak nihai sınırlarının bulunmasıdır. Bu amaçla geliştirilen algoritmada hedef; bloklara net bugünkü değerlerin girilmesinden ziyade bu değeri belirleyen

değişkenlerden faydalanarak net bugünkü değeri maksimize edebilecek sıralamanın belirlenmesi yönündedir. Bunun için; blok ekonomik değerleri ve kazı miktarı değişkenleri göz önünde bulundurularak birim hacim kazısı başına elde edilen ekonomik kazancın maksimize edilmesi yoluna gidilmiştir. Kazı sıralamasında istenilen blok kümelerinin bulunabilmesi için de klasik hareketli koni yönteminden faydalanılmıştır. Yöntemin çalışma içerisinde belirtilebilmesi için “Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi” ismi verilmiştir.

Geliştirilen algoritma, ekonomik değerleri girilmiş olan blok model üzerinde çalışmaktadır. Her iterasyonda, birim hacim başına düşen ekonomik değerın maksimum olduğu ve yıllık üretim kapasitesini geçmeyen blok kümeleri bulunup blok modelden çıkarılmaktadır. Bu blok kümeleri aranırken pozitif koni kullanılmaktadır. Pozitif koni ile elde edilen blok kümelerinin, negatif koni ile optimize edilmesinden sonra belirlenen blok kümesi blok modelden çıkarılır. Bu işlem alınabilecek pozitif değerli blok kalmayıncaya kadar devam etmektedir. Alınabilecek blok kümesi kalmadığında nihai sınırlara erişilmiş olur. Her iterasyonda bulunan blok kümeleri, yıllık üretim miktarına göre gruplandırılmakta ve net bugünkü değerleri hesaplanmaktadır.

Açık ocak nihai sınırlarının ve üretim sıralamasının diğer yöntemlere göre uygulanabilirliğinin test edilmesi, karşılaştırılabilmesi ve sonuçların değerlendirilebilmesi için; geliştirilen algoritma öncelikle 2B bir örnekte uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar; Lerchs ve Grossmann (1965) algoritması ile Wang ve Sevim (1992) tarafından önerilen parametreleştirme yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların 2B örnek üzerinde olumlu sonuçlar vermesinden dolayı 3B bir uygulama yapılması uygun görülmüştür. Bu uygulama için MS Visual Basic programlama dili kullanılarak kodlanan yazılımdan faydalanılmıştır. 3B uygulama için gerçek bir sahadan elde edilen manyetit içerikli (Fe_3O_4) maden yatağının verileri kullanılmıştır. Bu maden sahasından elde edilen sondaj verileri ve topoğrafya üzerinde rastgele ve mantıksal değişiklikler yapılarak yeni bir saha düzenlenmiştir. Daha sonra cevher ve yan kayaç için blok model oluşturulmuştur. Oluşturulan blok modelde toplam 279.658 blok bulunmaktadır. Bu blok model üzerinde öncelikle; madencilikte tasarım ve planlama üzerine geliştirilmiş olan Micromine programı kullanılarak, Lerchs ve Grossmann algoritması kullanarak çalışan parametreleştirme yöntemi ile iç içe ocaklar serisi elde edilmiş daha sonra da bu çalışmanın konusu olan Gelişmiş Hareketli Koni yöntemi ile üretim planlaması yapılmıştır.

Bu örnek saha üzerinde yapılan üretim planlaması sonuçlarına bakıldığında gelişmiş hareketli koni algoritması, açık ocak nihai sınırlarını bulma konusunda Lerchs ve Grossmann algoritması ile tamamen aynı optimum sonuçları vermektedir. Üretim sıralaması konusunda ise iç içe ocaklar serisi (parametreleştirme) yöntemiyle elde edilen ve ardından en iyi durum senaryosuyla hesaplanan net bugünkü değerin daha da üzerine çıkabileceği görülmüştür. Ayrıca yıllık üretim miktarı hedeflerinin daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olduğu yapılan uygulamalarda görülmektedir.

Sonuç olarak; geliştirilen yöntemin (Gelişmiş Hareketli Koni) açık ocaklarda uzun vadeli üretim planlaması amacıyla bulunan nihai sınırların ve üretim sıralamasının optimizasyonu için alternatif olarak kullanılabilecek bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan yöntemin işlem zamanı açısından geliştirilmesi gerekmektedir.

A NEW ALGORITHM FOR OPEN PIT MINE PRODUCTION PLANNING

SUMMARY

Open pit mine production planning is an optimization process involving many parameters from the beginning of mine life to end of mine life. Main idea behind the open pit production planning is the maximization of net present value or maximization of the total profit considering physical and economical constraints. When maximizing the net present value, determining ultimate open pit limit and production scheduling are decisive parameters.

Finding ultimate pit limit is finding optimum boundaries of an open pit that maximizes the total profit. However, this procedure maximizes the undiscounted profit. The time value of the money is not considered. The best and the most reliable methods to find the ultimate pit limit is Lerchs and Grossmann algorithm and maximum flow algorithm as everyone agrees. On the other hand, Moving Cone or Floating Cone algorithm is fast, simple, easy to understand and program therefore is used in many integrated mine design and planning software because of these reasons.

Open pit production scheduling or block scheduling are the problem of when to excavate which ore or waste block. When optimizing production scheduling net present value (NPV) from the pit should be maximized by considering the time value of money (discount rate). This means that profit obtained from pit at any time should be discounted. One reason this should be done, because the economical parameters such as mineral prices and costs can change in time. Another reason mine operator wants to recover capital cost invested at the beginning of the mine as early as possible. Many methods are developed in order to find the optimum open pit production schedule from 1960s to the present year like Linear Programming (LP), Integer Programming (IP), Mixed Integer Programming (MILP), Dynamic Programming (DP), Genetic Algorithms, Artificial Intelligence and Heuristic methods. The most commonly used method among these is to find nested pits by using parameterization technique. This technique is used by many mining software and can be applied changing input parameters like Revenue Adjustment Factor (RAF) and find a series of nested pits in every change.

There are many researchers and researches on open pit mine production planning optimization. Many of these researches first find ultimate open pit limit then tries to schedule production considering pit limits. However, when finding ultimate pit limit, time value of blocks are not considered and assumed they all have present values it remains the question of the ultimate pit limit is optimum or not. Because of this reason many researchers tried to develop methods that optimize the production planning and the ultimate pit limit simultaneously. In these methods, it is known which block is excavated when therefore it is possible to assign economical values to the blocks considering time factor.

In this doctoral research, previous researches tries to optimize long term production planning in open pit mines are examined and an alternative algorithm for open pit mine planning is developed. It is claimed that new algorithm developed works better than previous algorithms. The new algorithm optimizes open pit scheduling problem and finds the ultimate pit limit simultaneously by considering the time value of money. The algorithm gives higher total profit or net present value (NPV) than any other methods.

In the algorithm developed, the net present value (NPV) is maximized by using the variables determine the net present value (NPV) of the blocks instead of using a constant net present value (NPV) of the blocks. In order to that, unit profit is maximized by considering the variables such as block economical values and production rate. The aim is to maximize block economic value per extracted unit volume. In other words, the best sequence to maximize net present value (NPV) is to maximize block economic value per block (BEVPB). To find these BEVPBs the moving cone algorithm is utilized. The algorithm developed is called “Improved Moving Cone” algorithm.

Improved moving cone algorithm works on block with economical values. In every iteration, block clusters not exceeding yearly production rate and with maximum economical value per cubic meter are found and deleted from the block model. When searching for the block clusters positive cone is used. When a positive block cluster is found these blocks are deleted from the model after they are optimized with negative cone (Reverse Cone). This step is repeated until no block with positive or zero value is remained. When there is no block cluster remains it means that ultimate pit limit is reached. After every iteration, block clusters are grouped according to yearly production amount and then net present value is calculated for every production rate in the block model.

In order to test and compare developed improved moving cone algorithm with other previously developed ultimate pit limit and production planning algorithms, a 2D example problem is developed. The results obtained are compared with Lerchs and Grossmann (1965) algorithm and parameterization method developed by Wang and Sevim (1992). When the results are compared, it has been seen that the results were promising. The algorithm gives the same results with Lerchs and Grossmann algorithm for determining ultimate open pit limit and better results than Wang and Sevim’s suggestion for maximizing net present value (NPV).

Because of the promising results, a program is developed for 3D problems by using MS Visual Basic programming language. For 3D problem, a magnetite ore deposit is chosen as sample study area. The drillhole logs and topographic map is reorganized and used for example study. After that block model for ore and waste is developed in Micromine software. Block model has 279.658 blocks. On this block model, first ultimate pit is found by using Lerchs and Grossman algorithm, and then nested pits are obtained by parameterization method. Production planning is achieved by using Improved Moving Cone Algorithm.

After examining the results, it is concluded that Improved Moving Cone Algorithm gives the same optimum results with Lerchs and Grossman algorithm. There are 104.166.000 tons of ore and 144.504.000 tons of waste in the optimum pit limits. Stripping ratio was found 1,39 ton/ton. Revenue was 1.380.800.860TL as undiscounted cash. When it comes to production scheduling, Improved Moving Cone Algorithm gives higher net present value (934.557.426TL) than The Best Case

Scenario (928.238.520TL) in nested pit parameterization method if the discount rate is %10. In addition, annual production targets are better achieved than nested pits. The algorithm does not gives gap problem.

As a results, developed Improved Moving Cone Algorithm, optimizes ultimate open pit limit and production scheduling problems simultaneously and results in higher net present value. Therefore, it is a better alternative to previously developed algorithms. In the future, it can be possible to apply easily different slope angles or some important constraints like annual production rate to the algorithm.

1. GİRİŞ

Madencilik faaliyetleri genel anlamda kazançlı olarak nitelendirilse de bir o kadar da karmaşık, masraflı ve riskli faaliyetlerdir. Günümüzde açık ocak işletmeleri, son teknoloji ürünü olan ekipmanların kullanıldığı, otomasyon ile daha çok üretimin sağlanabildiği ve bu sayede düşük tenörlü metal yataklarında bile kazançlı olabilen oldukça büyük işletmelerdir. Büyük ve orta ölçekteki madencilik şirketleri, bazen kendi imkânlarıyla bazen de diğer kuruluşlardan aldıkları bilgi birikimi ve deneyim desteği ile şirket projelerini kazançlı hale çevirebilmek için uğraşmakta daha da ötesi maksimum kazancı elde edebilmek için çaba sarf etmektedirler. Bunun için yapılan planlama ve optimizasyon işlemleri şirketlerin geleceği konusunda son derece etkilidir (Gaupp, 2008).

Günümüzde optimizasyon ve simülasyon teknikleri hem yeraltı hem de açık ocak madenlerinde kullanılmaktadır. Bu teknikler sayesinde; madenin tasarımı, uzun ve kısa vadeli üretim planlaması, makine ekipman seçimi, ekipman sevkiyatı vb. işlemler daha verimli olarak yapılabilmektedir (Newman ve diğ., 2010).

1.1 Açık İşletmelerde Üretim Planlaması ve Önemi

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması, ocağın başlangıcından ömrünün sonuna kadar süren; bu süreç içerisinde optimize edilmesi ve karar verilmesi gereken birçok değişkeni olan bir planlama sürecidir. Bu planlama süreci, teknik ve ekonomik boyutlara sahip olan karmaşık bir işlemler dizisinden oluşur. Üretim planlamasının ana amacı, fiziksel ve ekonomik koşullar altında ocağın elde edilecek ekonomik değerin maksimize edilmesidir. Güvenilir ve mantıklı bir üretim planlaması için birbiriyle ilişkili birçok parametrenin hesaba katılması gereklidir. Elde edilebilecek en iyi sonuç, bu parametrelerin iyi analiz edilmiş bir kombinasyonu ile oluşur (Erarslan, 1996). Üretim planlamasında ocağın ekonomikliğini etkileyen birbiri ile ilişkili parametrelerden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Ocak boyutları
- Rezerv miktarı
- Tenör dağılımı
- Cevher sınır tenörü
- Ocak nihai şev açıları
- Ocak nihai sınırları
- Kazı sıralaması
- Ekipman seçimi
- Yıllık üretim miktarı
- Paranın zaman değeri

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması aşamalarından biri olan optimum ocak sınırlarının belirlenmesi, kazancı maksimize etmek amacıyla yapılan önemli bir adımdır. Bu değişkenin optimizasyonunun yapılmasındaki amaç; açık ocak nihai sınırlarının ocağın kazancını veya ekonomik değerini maksimize ettiği yere kadar getirilmesidir. Bu konuda günümüze kadar yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların esas amacı iskontosuz kazancın (Undiscounted Profit) maksimizasyonudur.

İskontolu net kazanç (Discounted Net Profit) ise ekonomik açıdan bakıldığında kazancın maksimizasyonu açısından daha gerçekçidir. Bunun sebebi ise ekonomik parametrelerin ve parasal değerlerin zamana göre değişiyor olmasıdır. Bu açıdan bakıldığında üretim planlamasına neden ihtiyaç duyulduğu anlaşılmış olur. Bu noktada paranın net bugünkü zaman değeri (NBD) (Net Present Value (NPV)) kavramının hesaba katılması gerekmektedir. Optimum olarak düşünülen nihai açık ocak sınırlarının, zaman kavramını hesaba katmadan bulunması yanıltıcı olabilir. Belirlenen açık ocak sınırlarının gerçekten de optimum olduğu ve bu sınırlar içerisinde yapılacak üretim planlamasının da optimum olduğu söylenemez. Bu konu, üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir problemdir (Erarslan, 1996).

Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesinden sonra atılacak adım bu sınırlar içerisinde üretim sıralaması yapmaktır. Kazı işleminin sıralaması, zamanın para üzerindeki etkisinden dolayı ocağın ekonomik değerini yüksek tutmada önemli rol oynamaktadır (Erarslan, 1996). Aynı nihai ocak sınırları içerisinde uygulanması mümkün olan birçok farklı üretim sıralaması yapmak mümkündür. Söz konusu alternatifler arasından bir tanesi uygulanmak üzere seçilmek zorundadır (Onur, 1992).

Açık ocaklarda üretim sıralaması veya kazı sıralaması, (Open Pit Mine Scheduling) aslında hangi malzemenin ne zaman kazılacağı ile ilgilidir. Bu işlem için maden yatağının küp veya dikdörtgenler prizması şeklindeki bloklara bölünmesi gereklidir.

Blokların boyutları genellikle üretim metoduna göre belirlenir. Kazı sıralamasını optimize etmenin amacı ise maden yatağından elde edilen gelirin net bugünkü değerini maksimize etmektir (Gaupp, 2008). Diğer bir deyişle açık işletmelerde üretim sıralaması veya kazı sıralaması ocaktan çıkarılacak olan blokların kazılma sırasını belirleyerek şimdiki zamana göre maksimum değeri veren sıralamanın yapılması olarak tanımlanabilir. Bu sıralamada; üretim miktarları, ocağın ömrü, tenör değişimi, sınır tenör, dekapaj maliyetleri, cevherin ekonomik getirisi, ocak nihai sınırları ve daha birçok parametre etkilidir (Osanloo ve diğ., 2008).

Optimum kazı sıralamasını belirleyerek yapılan kazı ile gelişigüzel yapılmış bir kazı arasında milyonlarca lira kazanç farkı olması muhtemeldir ve bu kazı sıralamasının belirlenmesi yoğun hesaplar içeren bir süreçtir. Bu sürecin veya çözüm zamanının kısaltılması için birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Ancak bunların çoğu optimum sonucu verememektedir. Çözümü garanti etmeye yönelik diğer çalışmalar ise maliyetli ve kullanışsız olduğu gibi optimum çözüme ulaşılması bazen günler sürebilmektedir. Bu da kullanıcıya parametreleri değiştirebilmesi esnekliğini kaybettirmektedir (Gaupp, 2008).

1.2 Literatür Özeti

Açık ocaklarda üretim planlaması amacıyla şu ana kadar yapılmış olan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları sadece açık ocak nihai sınırlarını belirlemekte, bazıları bu sınırlar içerisinde üretim sıralaması yapmakta, bazıları ise nihai sınırlar ile üretim sıralamasını eş zamanlı olarak belirleyebilmektedir. Bush (1999), Golosinski ve Bush (2000), Brahma (2007), Weintraub ve diğ. (2007), Osanloo ve diğ. (2008), Newman ve diğ. (2010), Bjørndal ve diğ. (2012) açık ocaklarda nihai sınırın belirlenmesi ve üretim sıralaması konusunu ele alan yöntemler üzerine literatür araştırmaları yapmış veya bu yöntemleri birbiriyle karşılaştırmışlardır. Bugüne kadar yapılmış olan bazı çalışmaların kısa özetleri aşağıda verilmiştir.

1.2.1 Açık ocak nihai sınırlarını belirleyen yöntemler

1965 yılından günümüze kadar açık ocak nihai sınırlarını optimize etmek amacıyla birçok yöntem geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu yöntemlerde amaç ocaktan elde edilecek gelirin maksimize edilmesidir.

Lerchs ve Grossmann (1965) açık ocak nihai sınırlarını belirlemek için dinamik programlama (Dynamic Programming) yöntemini ilk olarak kullanmışlardır. Bu yöntem, 2 boyutlu (2B) problemlerde doğru sonuçlar vermesine rağmen 3 boyutlu (3B) uygulamalarda yetersiz görülmektedir. Dinamik programlama, kolay anlaşılabilirliği ve bilgisayar ortamında kolay kodlanabilirliği nedeniyle sıklıkla kullanılan ve uygulanan bir yöntem olmuştur. Johnson ve Sharp (1971) LG algoritmasını 2B ortamda çözüp daha sonra 3B ortama nasıl uyarlanacağı konusunda çalışmalar yapmıştır. Ancak 3B uyumsuzluklardan dolayı optimum sonuç elde edilememiştir. Koenigsberg (1982) orijinal 2B dinamik programlama algoritmasını 3B uygulamalarda kullanabilmek için çalışmalar yapmıştır. Ancak Koenigsberg (1982) tarafından elde edilen sonuçlar optimum sonuçlardan uzak olmuştur. Wilke ve diğ. (1984) Koenigsberg algoritmasının formülasyonunu modifiye etmiş ve optimuma yakın çözümler sunan bir sonuç ortaya sunmuştur. Ancak işlem zamanının artması gibi bir sonuç ortaya çıkmıştır. Zhang ve Starfield (1985) dinamik programlama algoritmasının uygulamada oluşturduğu şekilsel sorunların çözümü için bir çalışma yayınlamışlardır. Wright (1987) dinamik programlama algoritmasını daha hızlı çalışabilecek şekilde modellemeye çalışmıştır. Algoritmanın daha hızlı çalışabilmesi için de bir dizi modifikasyondan geçirilmesi gerektiği belirtilmiş ise de bu modifikasyonlar sonucunda optimum olmayan sonuçlar elde edilmiştir. Wilke ve Wright (1984), Alford ve Whittle (1986) dinamik programlama ile nihai sınır tespiti konusunda uygulamalar ve bu yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırmalarını yapmışlardır.

Lerchs ve Grossmann (1965) açık ocak nihai sınırlarını belirlemek için dinamik programlama yöntemini kullandıkları yıl içerisinde grafik teorisini de (Graph Theory) bu amaçla kullanarak 3B çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Bu modelde bloklar düğüm noktaları olarak temsil edilmiş ve blokların arasına ağırlıklandırılmış ve yönlendirilmiş arklar yerleştirilmiştir. Bu arklar blok kazı sıralaması kısıtları olarak düşünülmüştür. Grafik teorisi ile elde edilen maksimum kapanımın bulunması sonucu nihai ocak sınırları bulunmaktadır. Bu yöntem 2B ve 3B uygulamalarda nihai sınırları belirleme konusunda optimum sonucu vermektedir. Lipkewich ve Borgman (1969) 2B ve 3B uygulamalarda grafik teorisinin özünde yer alan matematiksel kavramları ortaya koymuşlardır. Zhao ve Kim (1992) grafik tekniğine ekledikleri bazı modifikasyonlarla benzer bir yaklaşım ortaya koymuş ve kendi algoritmalarının daha hızlı sonuç

verdiğini iddia etmişlerdir. Underwood ve Tolwinski (1998) grafik tekniği ve matematiksel programlama konseptini kullanarak dual simpleks yöntemiyle 3B nihai sınırları belirlemek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Chen (1976) grafik yöntemini kullanarak 3B ocaklarda değişik şev açıları ile ocak nihai sınırlarının belirlenmesi ile ilgili bir çalışma yayınlamıştır.

Johnson (1968) ağ akış (Network Flow) yöntemini açık ocak nihai sınırlarını belirlemek için öneren ilk araştırmacıdır. Problemin bir maksimum akış (Maximum Flow) problemi olarak çözülmesi, problemin mantığına uygun görülmüştür. Ağ akış analizinin amacı; başlangıç noktası ile bitiş noktası arasındaki akış miktarını, kurulan ağ modeli üzerinde maksimize etmektir. Johnson ve Barnes (1988) bu algoritmayı başarıyla uygulamışlardır. Giannini ve diğ. (1991) yöntem üzerinde çalışmış ve maksimum akış algoritması ile çalışabilen PITOPTIM yazılımını geliştirmişlerdir. Yegulalp ve Arias (1992) ve Yegulalp ve diğ. (1994) tarafından bu yöntem hızlandırılarak başarıyla uygulanmış ve performans karşılaştırması yapılmıştır. Hochbaum ve Chen (2000) grafik tekniği ile itme-etiketleme (push-relabel) maksimum akış algoritmasını karşılaştırmış ve bazı iyileştirmeler önermişlerdir.

Pana (1965) tarafından geliştirilen hareketli koni (Floating Cone ya da Moving Cone) algoritması, sezgisel yöntemlerin başlangıcı olarak görülebilir. Algoritma; her bir cevher bloğunun, üzerindeki bloklarla beraber şev açlarına uygun bir koni oluşturmaya ve pozitif ekonomik değere sahip olan blok kümelerinin bulunup çıkarılması mantığına dayanır. Hem manuel olarak hem de programlama açısından kullanımı basittir. Çalışma prensibi olarak farklı şev açılarını hesaba katarak 3B uygulamalarda verimli olabileceği düşünülmese de rağmen daha sonradan hem 2B hem de 3B uygulamalarda optimum sonuçlar veremediği görülmüştür. Daha sonra Korobov (1974) hareketli koni algoritmasının yapmış olduğu hataları düzeltmeye çalışmış ve daha da geliştirmiştir. Ancak Dowd ve Onur (1992) tarafından Korobov algoritmasında da bir hata bulunmuş ve yapılan köklü bir değişikliklerle daha hatasız hale getirilmiştir. Literatürde bu yöntem düzeltilmiş Korobov algoritması olarak geçmektedir. Lemieux (1979), hareketli koni algoritmasının hatalarından kurtulması amacıyla pozitif koni ve negatif koniyi aynı anda kullanan bir algoritma geliştirmiştir. Berlanga ve diğ. (1989) ve Laurich ve Kennedy (1990) hareketli koni yönteminin eksik kaldığı bazı noktaları daha da geliştirmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri deneyimlere göre hareketli koni algoritması LG algoritmasına göre daha hızlı sonuca ulaşmaktadır.

Yamatomi ve diğ., 1996 bir takım geliştirmelerle dinamik koni (Dynamic Cone) algoritmasını tanıtmışlardır. Hareketli koni algoritması, her türlü şev açısı ile çalışabilen, hızlı sonuç üretebilen ancak optimum sonuçtan sapmalar meydana getiren bir yöntem olmakla beraber sağladığı avantajlardan dolayı gelecek çalışmalar için değerlendirmeye değer bulunmaktadır.

Meyer (1969) doğrusal programlama (Linear Programming) konseptini nihai ocak sınırlarını belirlemek için kullanmıştır. Bu çalışma ise kendi ifadesiyle optimum olmayan çözümlerle sonuçlanmıştır. Ayrıca hesaplama zamanı açısından pratik gözükmemektedir. Huttagosol ve Cameron (1992) bir doğrusal programlama yöntemi olan ulaştırma algoritmasını (Transportation Algorithm) kullanarak açık ocak nihai sınırlarını bulmayı denemiştir. Bu algoritma ile problem çözölürken simpleks yöntemi kullanılmaktadır. Problem çözme hızı diğerlerine göre daha yavaştır ve sistem gereksinimi fazladır.

Jalali ve diğ. (2006) stokastik proses (Stochastic Process) algoritmasını, Achireko ve Frimpong (1996) yapay sinir ağları (Artificial Neural Network) yöntemini açık ocak nihai sınırlarını belirlemek amacıyla kullanmışlardır.

Bu algoritmaların birçoğu gerçek optimum sonucu verebilme açısından başarısız bulunmaktadır. Ancak grafik teorisi ve network akış algoritmasının nihai sınırları optimum olarak belirleyebildiğı matematiksel olarak kanıtlanmıştır (Whittle ve Rozman, 1991).

1.2.2 Açık ocak nihai sınırlarının bulunmasından sonra yapılan üretim sıralaması

Üretim planlamasında, açık ocak nihai sınırlarının bulunmasından sonra bu sınırlar içerisinde kazı sıralaması yapan yöntemler en sık kullanılan ve geleneksel diyebileceğimiz yöntemlerdir. Bu yaklaşım üzerinde daha önce yapılan sayısız araştırma ve kullanılan sayısız algoritma bulunmaktadır.

Johnson (1968) blok kazı sıralaması problemini çözmek için Dantzig-Wolfe ayrıştırma prensiplerini kullanarak çok-zamanlı dönem problemini tek-zamanlı dönem problemine çevirmiş ve ayrı ayrı ele almıştır. Burada ana-problem üretim kısıtları ve cevher tesisine beslenecek malzeme iken; alt-problem ise sıralama kısıtları olarak düşünölebilir. Osanloo ve diğ. (2008), bu yöntemin sıralama konusunda yanlışlıklar

yaptığını ve bu yöntemin ancak küçük boyuttaki veri setleriyle verimli olabileceğini belirtmişlerdir.

Roman (1974) dinamik programlama yöntemini kullanarak blokları numaralandırmış ve maksimum net bugünkü değeri veren optimum sıralamayı belirlemeye çalışmıştır. Bu yöntem küçük boyuttaki veri setlerinde bile çok yavaş çalışmaktadır. Ayrıca her zaman diliminde üretim ve proses kısıtlarını karşılamayı garanti edememektedir.

Gershon (1982) doğrusal programlama uygulaması ile üretim planlaması konusunda bir çalışma yapmış ve uygulamış olduğu planlama yönteminde ocaktan cevher hazırlama tesisine ve de piyasaya yapılacak olan sevkiyatı en kârlı hale getirecek planlamayı bulmaya çalışmıştır. Gershon (1982), ocak-tesis-piyasa birimleri arasındaki sevkiyatı ocağın tüm ömrü boyunca optimize ederek uzun vadeli, orta vadeli ve kısa vadeli üretim planlamasını aynı model üzerinde çözmeye çalışmıştır. Kendisinin geliştirmiş olduğu planlama yönteminde belirli bir zaman dilimi için ekipman, tesis, pazarlama kısıtları göz önünde bulundurularak ocak nihai sınırları bulunur ve bu sınırlar içerisinde kazı sıralaması gerçekleştirilir.

Dagdelen (1986) büyük çaptaki kazı sıralaması problemlerini karışık tamsayı programlama (mixed integer programming (MIP)) formülasyonu üzerinden ayrıştırmak ve çözmek amacıyla lagrange gevşetme (Lagrange Relaxation) yöntemini kullanmıştır. Bu yaklaşımın dezavantajı lagrange çarpanlarının uygun olmayan çözümler sunması durumunda lagrange yönteminin her zaman optimum sonucu verememesidir (Ramazan, 2007).

Gershon (1987) üretim planlaması için blokların konumlarını hesaba katarak geliştirdiği sezgisel bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde belirli bir zaman diliminde blokların konumlarına göre çıkarılabilme öncelikleri ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklara göre en yüksek öncelikli blok alındıktan sonra geri kalan blokların öncelikleri tekrar hesaplanır ve tekrar aynı işlemler yapılır. Bu döngü ocak nihai sınırları içinde alınacak blok kalmayınca kadar devam eder.

Dowd ve Onur (1992) dinamik programlamayı kullanarak nihai sınırlar içerisinde kalan blokların kazı sıralamasını planlamıştır. Kullandıkları yöntemde kullanılan blokların sayısı arttıkça işlem zamanı da üstel olarak artmıştır. Bu sorun ile ilgili olarak kazılması uygun olmayan birçok bloğun elimine edilebileceğini ve böylece araştırma alanının küçültülebileceğini belirtmişlerse de bu önerinin çözüme yardımcı

olabileceğini ancak problemi tamamen ortadan kaldırmadığını ve büyük çaptaki madenlerde bu yöntemin pratik olmadığını kabullenmişlerdir.

Tolwinski ve Underwood (1992) açık ocaklarda üretim planlaması konusunda hem fiziksel hem de ekonomik kısıtları göz önünde bulundurarak optimize etmek amacıyla dinamik programlama yöntemini kullanmışlardır. Ocağın başlangıç aşamasından nihai ocak sınırlarına kadar olan gelişimini, iç içe ocakların (nested pits) sıralaması olarak düşünüp optimizasyon modeli oluşturmuşlardır.

Onur ve Dowd (1993) kazı sıralamasının yapılarak cevherin çıkarılması için fiziksel parametrelerin (nakliye yolları ve bermler) nihai ocak sınırlarına dâhil edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Basit bir blok tasarımı tanımlayarak nakliye yollarını da ocak sınırları içerisine dâhil etmişlerdir.

Diğer yöntemlerden farklı olarak ortaya çıkarılan bir diğer yaklaşım da Matheron (1975) tarafından madencilğe uyarlanan parametreleştirme (Parameterization) yöntemidir. Bu algoritma problemi iki ayrı parçaya ayırarak (teknik ve ekonomik) metal miktarını maksimize etmeye çalışır. Daha sonra Francois-Bongarcon ve Marechal (1976), Francois-Bongarcon ve Guibal (1982), Dagdelen ve Francois-Bongarcon (1982), Francois-Bongarcon ve Guibal (1984) ve Coleou (1989) tarafından bu algoritma ayrıntılarıyla tanıtılmış ve üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Francois-Bongarcon ve Guibal (1982) kullandıkları yöntemi MULTIPIT adındaki ticari yazılım haline getirmişlerdir. Whittle (1988) daha sonra kazı maliyetinin metal fiyatına oranını parametreleştirerek Whittle 4-D (Whittle, 1993) ve Four-X (Whittle, 1998) yazılımlarını geliştirmiştir. Bu yazılım artan ekonomik parametrelere göre ocak boyutlarını genişletmektedir. Wang ve Sevim (1995) ise bu yönetime alternatif olabilecek bir yöntem geliştirdiklerini belirtmişlerdir.

Tolwinski ve Golosinski (1995), Tolwinski (1998) blok kazı sıralaması problemini çözebilmek için derinlik önceliği esasına dayanan bir yöntem önermişlerdir. Kullanılan yöntem operasyonel kısıtları karşılayabilir ve büyük çaptaki veri setlerinde kullanılabilir olsa da net bugünkü değer (NBD) maksimizasyonunu sağlama konusunda garanti verememektedir.

Halatchev (2002) bir açık ocağın zamansal ve fiziksel planlama açısından farkını vurgulamıştır. Halatchev'e göre açık ocaklarda fiziksel planlama; ocak basamaklarının şekil ve boyutlarının belirlenmesini; zamansal planlama ise kazı aktivitelerinin

sıralanmasını ele almaktadır. Bunu yaparken bu iki planlama açısının birbirine olan bağımlılığını açıklamakta ve nihai sınırların elde edilmesinden sonra yapılacak blok kazı sıralamasının eksikliklerinden bahsetmektedir.

Caccetta ve Hill (2003), uzun dönem üretim sıralaması problemlerini karışık tamsayı programlama ile çözmek amacıyla Dal-Kesme (Branch and Cut) algoritmasını kullanmışlardır. Bu algoritmayı ticari bir yazılım haline getirmişlerdir.

Dagdelen (2005) sınır tenörün belirlenmesi ile blok kazı sıralamasının nasıl entegre edilebileceğini belirtmiş ve sırasıyla bir bloğun kazılıp kazılamayacağını, kazılacaksa ne zaman kazılacağını ve son olarak kazılan cevherin nasıl işleneceği konusunda çalışmalar yapmıştır.

Ramazan (2001, 2007) kümeleme (Clustering) yaklaşımını kullanarak blok verilerini daha küçük parçalara ayırmak istemiş ve buna uygun bir algoritma geliştirmiştir (Fundamental Tree Algorithm). Böylece tamsayı değişkenlerinin ve karışık tamsayı programlama formülasyonunda gerekli olan kısıtların sayısı düşmüş olur.

1.2.3 Açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasını eş zamanlı olarak belirleyen yöntemler

Açık ocak madenciliğinde planlama amaçlı olarak kullanılan üç aşamalı geleneksel yaklaşımlar artık yerini nihai ocak sınırı, fazlar (phase, pushback) ve blok kazı sıralamasını aynı anda belirlemeye çalışan modern yaklaşımlara (eş zamanlı yaklaşımlar) bırakmıştır. Cevher içerisinde yer alan her blok analiz edilmekte ve eğer kazılacaksa bloğun kazılma zamanı belirlenmektedir. Oluşturulan bu kazı sıralamasından yola çıkarak ve aynı zamanda üretim-zenginleştirme hedefleri gibi işletme kısıtları da göz önünde bulundurularak fazlar oluşturulabilmektedir. Üretim sıralaması yapılan bütün bloklar çıkarıldıktan sonra ortaya çıkan ocak ile nihai sınırlara ulaşılır. Bu nihai sınırlar, ocaktaki cevher bloklarının net bugünkü değerlerine bağlı olarak optimize edilmiştir.

Her aşamada optimuma yakın sonuç veren üç aşamalı geleneksel yaklaşımlar, yerini optimum sonuç veren tek aşamalı modern yaklaşımlara bırakmaktadır. Kazı sıralamasını oluşturmak için ocak nihai sınırlarının belirlenmesine gerek olmadığından dolayı, eşzamanlı yaklaşımlar öncelikli olarak ocak nihai sınırlarını hesaplamamaktadır. Aslında geleneksel yöntemlerle elde edilen nihai ocak sınırları ile blok kazı sıralaması sonucu elde edilen nihai ocak sınırlarının birbirinden farklı olma

ihhtimali bulunmaktadır. Bunun nedeni paranın zaman değeri ve diğeri işletme kısıtlarının blok kazı sıralamasına dâhil edilmesidir ki geleneksel yöntemlerde bu parametreler hesaplamalara dâhil edilmemektedir (Gaupp, 2008).

Blok kazı sıralamasını bulmak için kullanılan eş zamanlı yaklaşımlar çözülmesi zor bir problem oluşturmalarına rağmen; sadece belirli bir faz içerisinde değil cevher modelindeki bütün bloklar hesaba katıldığı için, elde edilen sonuç optimumdur. Belirlenen optimum blok kazı sıralaması dolaylı olarak da fazların sıralaması ve ocak nihai sınırlarının belirlenmesi demektir ki bu sonuçlar içerisinde iskonto faktörü yani paranın zaman değeri de yer almaktadır. Eş zamanlı yaklaşımlar açık ocak nihai sınırlarını, fazları ve blokların kazı sıralamasını eş zamanlı olarak belirleyen tek aşamalı bir işlemdir (Gaupp, 2008).

Wang ve Sevim (1992, 1995) sezgisel bir yaklaşım olan ve Gershon (1987) tarafından uygulanan Konumsal Ağırlık (Positional Weight) yöntemini nihai sınırları önceden belirlemeye gerek duymadan kullanmıştır. Bu yöntem aynı zamanda üretim planlaması için iç içe ocaklar serisini bulma amacıyla kullanılan parametreleştirme yöntemine bir alternatif olarak tanıtılmıştır. Wang ve Sevim, parametreleştirme yönteminin genellikle birbirinden kapasite açısından farklı olan ardışık ocaklar verdiğini bunun nedeninin ise operasyonel kısıtların hesaba katılamaması olduğunu belirtmişlerdir. Wang ve Sevim, üretim ve cevher hazırlama tesislerinin kapasite limitlerini karşılayabilen ve kontrol edilebilir boyutlarda artışlarla iç içe ocaklar serisini oluşturan bir algoritma geliştirerek aralık probleminin üstesinden gelmişlerdir. M+N blok içerisinde en düşük ağırlığa sahip olan N bloklarını kademe kademe sistemden ayırıştırarak bir sıralama oluşturmuştur. Bu sıralama ile en sonda kalan blok kümesi üretim planında ilk önce kazılması gereken kısımlardır. Daha sonra geri kalan bloklar ağırlıklarına göre maksimumdan minimuma doğru sırasıyla kazılır.

Denby ve Schofield (1994) nihai açık ocak sınırları ve blok kazı sıralamasının birbirine bağlı olduğunu ve eş zamanlı olarak belirlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple genetik algoritmaları kullanarak eş zamanlı bir şekilde açık ocak nihai sınırlarını ve kazı sıralamasını belirlemeye çalışmışlardır. Net bugünkü değerin maksimize edilmesi konusunda küçük problemlerde ilerleme kaydetmişlerse de büyük çaptaki problemlerde işlem zamanı aşırı artış göstermektedir.

Elevli (1995), dinamik programlama ve yapay zekâ (Artificial Intelligence) uygulamalarından biri olan yapay öğrenme (Machine Learning) kavramlarını kullanarak blok kazı sıralaması ve ocak nihai sınırlarını eş zamanlı olarak belirleyebilecek yeni bir yöntem sunmuştur. Bu yöntemde teknik ve ekonomik kısıtlar içerisinde NBD maksimizasyonu hedeflenmiş ve işlem zamanı açısından daha kısa bir şekilde çözüme ulaştığı belirtilmiştir. Osanloo ve diğ. (2008), Elevli'nin uyguladığı yöntemin avantajları ve dezavantajlarını açıklamışlardır. Dezavantaj olarak yöntem, aralık problemi oluşturmakta ve matematiksel olarak optimum sonucu garantilememektedir.

Sevim ve Lei (1998) açık ocaklarda üretim programlamasında eşzamanlı yaklaşımın nasıl olması gerektiğini tanımlamış ve uzun vadeli üretim planlamasında belirlenmesi gereken dört parametreyi sıralamışlardır. Bunların ilki yıllık üretim miktarı; ikincisi belirli bir yıl içerisinde hangi blokların kazılması gerektiği; üçüncüsü bloğun cevher veya dekapaj olup olmadığını belirlemeye yarayan sınır tenör değeri; dördüncüsü ise ocak nihai sınırlarıdır. Bu dört parametrenin birbiriyle döngüsel bir ilişkide olduğunu ve eş zamanlı olarak bu problemin nasıl çözülebileceğini göstermişlerdir. Yöntemleri, en yüksek NBD sıralaması oluşturan bir iç içe ocaklar serisi vermeyi amaçlamaktadır. Çalışmalarında sezgisel yaklaşım ve dinamik programlama yönteminin birleşimini kullanmışlar ve bir örnek üzerinde uygulama yaparak yöntemin avantajlarını göstermişlerdir.

Akaike ve Dagdelen (1999) lagrange gevşetmesini kullanarak tamsayı programlama formülasyonunu bir network tabanlı problem haline dönüştürmüşlerdir. Lagrange gevşetmesi, bir karışık tamsayı programında yer alan yan kısıtların karmaşıklığını gidermek amacıyla kullanılan ve problemi daha takip edilebilir bir formülasyona dönüştüren bir yöntemdir. Gevşetilmiş olan problem daha sonra Lerchs-Grossman tarafından üç boyutlu olarak nihai ocak sınırlarını bulmak için kullanılan grafik tekniği ile çözülebilir. Akaike ve Dagdelen (1999) orijinal kapasite kısıtları gevşetilmiş problem çözümünü karşılayana kadar bir iteratif süreç kullanarak Lagrange çarpanlarının değerlerini değiştirmişlerdir. Kullandıkları yöntemde proses kapasitesi ve ortalama tenör kısıtları yer almamaktadır.

Erarslan ve Celebi (2001) üretim planlamasının bir fonksiyonu olarak nihai sınırları bulan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde tenör, harmanlama tesisi, üretim ve

diğer operasyonel kısıtlara bağılı olarak NBD maksimizasyonu hedeflenirken dinamik programlamadan faydalanılmıştır.

Kumral ve Dowd (2002) iki aşamalı optimizasyon çözümünü ve tavlama benzetimi (Simulated Annealing) yaklaşımını kullanarak kazı sıralamasını optimize etmeye çalışmışlardır. Yöntem ilk aşamada lagrange gevşetme yaklaşımını kullanıp alt-optimum başlangıç çözümünü bulur. Ardından ise ikinci aşama olarak alt-optimum sıralamayı geliştirmek amacıyla çok amaçlı tavlama kullanılır.

Ramazan ve Dimitrakopoulos (2004) karışık tamsayı programlama yöntemini kullanarak değişken sayısını ve işlem zamanını düşürmeyi hedeflemiştir. Bu yöntemi uygularken şev açıları, harmanlama tesisi gereksinimleri, cevher üretimi ve ocak kapasitesi kısıtları altında cevherin iskontolu NBD değerini maksimize etmeyi amaç edinmiştir. Ayrıca ikili değişkenlerin sayısını düşürme konusunda pozitif değerli blok (cevher) ve negatif değerli blok (dekapaj) ayrımını yapmayı önermişlerdir. Analizler sonucunda bu tarz bir yaklaşımın problemin çözüm zamanını önemli oranda düşürdüğü belirtilmiştir.

Ramazan ve Dimitrakopoulos (2004) kazılmamış cevher modelinin değişkenliğinden dolayı, karışık tamsayı programlama formüllerinin pratik olarak madencilik programlaması konusunda başarısız olduğunu göstermişlerdir. Bu sebeple, belirli bir dönemde programlaması yapılacak olan blokların olasılığını göz önünde bulunduran alternatif bir karışık tamsayı programlama formülasyonu önermişlerdir. Böylece yerinde cevherin değişkenliği ve programlama konusundaki diğer pratik olmayan durumlar ortadan kalkmıştır. Bu programlama yöntemini kullanarak; genellikle cevherleşme belirsizliği göstermesiyle bilinen bir polimetal maden yatağında uygulama yapmışlar ve uygulanabilirliğini göstermişlerdir.

Menabde ve diğ. (2004) madencilikte optimizasyon problemi konusunda belirsizlik faktörünü de göz önüne almış ve bir dizi koşullu simülasyon yapılmış cevher modeli kullanarak incelemeler yapmıştır. Bu yöntem ile blok kazı sıralaması ve sınır tenör değerlerini eş zamanlı olarak optimize etmişlerdir.

Kawahata (2007) lagrange gevşetme prosedürünü geliştiren Dagdelen (1986) yaklaşımını genişletmiş ve dinamik sınır tenör değişkenini de ekleyerek ocağın NBD'ni formülasyona eklemiştir. Optimum çözüm uzayını belirlemek amacıyla iki

lagrange gevşetme alt problemi kullanmıştır. Bunlardan biri en agresif kazı sıralaması durumu ve diğeri de en risksiz kazı sıralaması durumudur.

Boland ve diğ. (2009) ikili değişkenlerin sayısını azaltmak için agregasyon tekniğini kullanmışlardır. Maden yatağındaki üretimi programlamak için agresif blok agregasyonunu kullanmışlar ve daha sonra veri setini disagregasyon yoluyla dönüştürerek bireysel bloklar haline getirip öğütücülerdeki proses kararlarını optimize etmişlerdir. Agregasyon yapılarak elde edilmiş ve çözümü bulunmuş veri setinin disagregasyonu için iteratif bir proses önermişlerdir.

Sattarvand (2009) meta-sezgisel bir yaklaşım olan karınca kolonisi optimizasyonu (Ant Colony Optimization) yöntemini kullanarak üretim sıralaması ve nihai sınır konusunda yeni bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yöntem rastgele seçilmiş bloklardan oluşan iki boyutlu bir model üzerinde uygulanmıştır. Bu uygulamada ocağın net bugünkü değerinin bu yöntemle arttırılabileceği görülmüştür.

1.3 Açık İşletmelerde Uzun Vadeli Üretim Planlaması Problemi

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması yapılmasının amacı ocaktan maksimum gelirin elde edilmesidir. Gelir maksimizasyonunu etkileyen en önemli değişkenler ise ocağın nihai sınırları ve üretim sıralamasıdır.

1960'lı yıllardan günümüze kadar açık ocak sınırlarının ve üretim sıralaması optimizasyonunun sağlanması için birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda öncelikle açık ocak nihai sınırları tespit edilmekte ve bu sınırlara göre üretim sıralaması yapılmaktadır. Ancak nihai sınırlar elde edilirken kullanılan blok ekonomik değerleri şimdiki zamana göre alınmakta ve bu blokların gerçekte çıkarılacak olduğu zamandaki değerleri dikkate alınmamaktadır. Oysaki madencilik sektöründe bir ocağın ömrü onlarca sene sürebilmektedir.

Bu şartlar altında; blokların ekonomik değerlerinin maksimizasyonunu sağlayan yöntemlerle bulunan nihai sınır tespitinde blokların çıkarılış zamanına göre ekonomik değerlerinin verilmemesi, nihai sınırların gerçekten de nihai sınırlar olmayabileceğini düşündürmektedir. Bu nihai sınırları kabul ederek yapılan üretim sıralaması da hata yapma ihtimalini arttırmaktadır. Bu hatadan kurtulmak için paranın zaman değerini dolayısıyla da blokların çıkarılış zamanına göre değerlerinin hesaba katan bir yöntemin uygulanması gerekli görülmektedir. Ancak bu durumda blokların çıkarılış

sırası belli olmadığından dolayı bloklara hangi zamanın ekonomik değeri atanacağı bilinmemektedir. Bu döngüsel problemin asıl sebebi Whittle (1989) tarafından şöyle açıklanmaktadır: “Maksimum ocak değerini veren nihai sınırlar, blokların ekonomik değerleri bilinmeden bulunamaz. Blok ekonomik değerleri ise blok kazı sırasına karar verilmeden bilinemez. Blok kazı sırası ise ocak nihai sınırları belirlenmeden bulunamaz”. İşte bu nedenle; açık ocak işletmelerinde nihai sınır ve üretim sırası optimizasyonu çözülmesi zor bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Açık işletmelerde üretim planlaması konusunda şu ana kadar yapılan birçok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmalarda yer alan aşağıdaki gibi bir veya birkaç farklı genel problem dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır;

- Üretim sıralaması ve nihai sınırların eş zamanlı olarak incelenememesi
- Bloklara verilen şimdiki zaman değerleri ile nihai sınırların bulunması diğer bir deyişle paranın zaman değerinin hesaba katılmaması
- Sınır tenör değerinin sabit olarak kabul edilmesi
- Şev açılarının bazı yöntemlerde uygulanabilme zorluğu
- Büyük çaptaki maden yataklarında blok sayılarının çok olmasından dolayı işlem zamanının çok fazla olması
- Belirlenen kazı sıralamasında yer alan ardışık ocaklar serisinin üretim miktarlarının kapasite açısından birbirinden çok farklı olabilmesi (aralık problemi (gap problem))

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması amacıyla; paranın zaman değerini göz önünde bulundurarak maksimum net bugünkü değeri verebilen, optimum nihai sınırları ve kazı sıralamasını eş zamanlı olarak bulabilen, farklı şev açılarında çalışabilen, büyük çaptaki maden yataklarında uygulanabilen, kullanıcı dostu, kolay anlaşılır ve hızlı çalışan bir yöntemin eksikliği günümüzde hissedilmektedir.

1.4 Tezin Amacı

Bu doktora tezi kapsamında, açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalara alternatif olabilecek bir algoritma geliştirilmiştir. Tezin amacı, açık ocaklarda net bugünkü değerin maksimizasyonunu sağlayacak üretim sıralamasının elde edilmesi ve aynı zamanda

açık ocak nihai sınırlarının bulunmasıdır. Bu amaçla geliştirilen algoritmada hedef; bloklara net bugünkü değerlerin girilmesinden ziyade bu değeri belirleyen değişkenlerden faydalanarak net bugünkü değeri maksimize edebilecek sıralamanın belirlenmesi yönündedir. Bu amaçla üzerinde çalışılacak olan yöntemin;

- Üretim sıralaması yapıldığında net bugünkü değeri maksimize edebilen
- Üretim sıralamasını belirlerken eş zamanlı olarak açık ocak nihai sınırlarını da belirleyebilen
- Açık ocak nihai sınırlarının tespitinde sıklıkla kullanılan ve her zaman optimum sonuçlar veren Lerchs-Grossmann algoritmasına alternatif olabilecek doğrulukta nihai sınır tespiti yapabilen
- İhtiyaç duyulduğunda; şev açısı, yıllık üretim miktarı, cevher hazırlama tesisine beslenecek ortalama tenör, metal miktarı vb. benzer kısıtların entegre edilebileceği
- Anlaşılması, kullanılması ve programlanması kolay olan
- Aralık problemi (gap problem) oluşturmayan

bir yöntem olması hedeflenmiştir.

1.5 Yöntem

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlamasının optimizasyonunda kullanılması düşünülen bu algoritmada net bugünkü değerlerin maksimize edilmesi ve ocak nihai sınırlarının belirlenebilmesi amacıyla blok ekonomik değerleri ve kazı miktarı değişkenleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu değişkenlerden faydalanarak birim hacim kazısı başına elde edilen ekonomik kazancın maksimize edilmesi yoluna gidilmiştir. Kazı sıralamasında istenilen blok kümelerinin bulunabilmesi için de klasik hareketli koni yönteminden faydalanılmıştır. Yöntemin çalışma içerisinde belirtilebilmesi için “Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi” ismi verilmiştir.

Geliştirilen algoritma, ekonomik değerleri girilmiş olan blok model üzerinde çalışmaktadır. Her iterasyonda, birim hacim başına düşen ekonomik değerlerin maksimum olduğu ve yıllık üretim kapasitesini geçmeyen blok kümeleri bulunup blok modelden çıkarılmaktadır. Bu blok kümeleri aranırken pozitif koni kullanılmaktadır. Pozitif koni ile elde edilen blok kümelerinin, negatif koni ile optimize edilmesinden

sonra belirlenen blok kümesi blok modelden çıkarılır. Bu işlem alınabilecek pozitif değerli blok kalmayıncaya kadar devam etmektedir. Alınabilecek blok kümesi kalmadığında nihai sınırlara erişilmiş olur. Her iterasyonda bulunan blok kümeleri, yıllık üretim miktarına göre gruplandırılmakta ve net bugünkü değerleri hesaplanmaktadır.

Bu algoritmada uygulanacak adımlar genel olarak aşağıda verilmiştir;

1. Blok model içerisindeki her bir bloğa ekonomik değerlerinin girilmesi
2. Her iterasyonda yıllık üretim kapasitesi göz önünde bulundurularak; hareketli koni yöntemi ile birim blok kazısı başına düşen blok ekonomik değerinin maksimum olduğu blok veya blok kümesinin bulunması ve blok modelden çıkarılması
3. Blok model içerisinde alınabilecek pozitif değerli blok kalmayıncaya kadar 2 no'lu işleme devam edilmesi
4. Alınabilecek pozitif değerli blok kalmayınca oluşan sınırların açık ocak nihai sınırı olarak kabul edilmesi
5. Her iterasyonda bulunan blok veya blok kümelerinin üretim sıralaması olarak kabul edilmesi, gruplandırılması ve net bugünkü değerinin hesaplanması

2. AÇIK İŞLETMELERDE UZUN VADELİ ÜRETİM PLANLAMASI

Günümüzde; yükselen küresel rekabet, teknoloji, kalite standartları, çevresel farkındalık ve pazar talebi; azalan rezerv miktarları ve tenör değerleri; değişken ekonomi ve değişken metal fiyatları nedeniyle maden rezervlerinin çıkarılması için yapılan tasarım ve planlama işlemlerinin daha dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Özellikle ilk yatırım maliyeti yüksek ve ömrü onlarca yıl süren maden işletmelerinde atılacak her adımın önceden belirlenmesi veya tahmin edilmesi önem arz eder. Bu nedenle madenlerde üretim planlaması konusunda, son elli yıl içerisinde birçok araştırmacı tarafından algoritma ve yöntemler geliştirilmiş; birçok yazılım firması daha iyi ve optimum çözümler elde etmek amacıyla kullanıcılara farklı çözümler sunmaya çalışmıştır.

Açık ocak madenciliğinde üretim planlaması problemi, fiziksel ve ekonomik kısıtlar altında ocaktan elde edilecek iskonto edilmiş toplam kazancı maksimize eden üretim sıralamasının belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Üretim sıralamasını etkileyen kısıtlar ise genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Caccetta, 2007);

- Cevher ve dekapaj üretim miktarı
- Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesislerinin kapasitesi
- Tesislere beslenecek olan malzemenin tenör değeri
- Stok sahası kapasitesi ve minimum stok miktarı
- Minimum ocak tabanı genişliği ve maksimum derinlik gibi operasyonel kısıtlar

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması, üç zaman aralığı altında incelenmektedir (Osanloo ve diğ., 2008);

- i. Uzun Vadeli Üretim Planlaması
- ii. Orta Vadeli Üretim Planlaması
- iii. Kısa Vadeli Üretim Planlaması

Uzun Vadeli Üretim Planlaması'nda, ocak ömrünün sonuna kadar olan planlamalar yapılmaktadır. Orta Vadeli Üretim Planlaması'nda ise ocağın toplam ömrü 1-5 yıllık zaman dilimlerine bölünerek biraz daha detaylı olarak incelenir. Kısa Vadeli Üretim Planlaması'nda ise ocağın 1-6 aylık zaman dilimleri dikkate alınarak çok daha detaylı bir şekilde planlama yapılmaktadır (Osanloo ve diğ., 2008).

Madencilikte; cevher katı modeli, blok modele dönüştürülüp bloklara gerekli değer atamaları yapıldıktan sonra modelde yer alan her bir blok ile ilgili çok önemli olan üç karar aşaması bulunmaktadır. Bu karar aşamaları aşağıda verilmiştir (Dagdelen ve Johnson, 1986);

- i. Söz konusu blok kazılacak mı yoksa kazılmayacak mı?
- ii. Eğer kazılacaksa ne zaman kazılacak?
- iii. Eğer kazılacaksa bu blok cevher hazırlama tesisine mi yoksa dekapaj döküm sahasına mı gidecek?

Açık ocak üretim planlaması, yukarıda bahsedilen aşamaların yerine getirilmesi ve işletmenin nakit akışlarının net bugünkü değerlerinin maksimize edilmesi işlemidir. Üretim planlamasının; jeolojik, fiziksel ve ekonomik kısıtlar altında işletme kârını maksimize edecek şekilde belirlenebilmesi için işletmedeki bütün sistemlerin bir bütün olarak düşünülmesi gereklidir. Bu yüzden üretim planlamasında en önemli problem yukarıda bahsedilen kısıtları göz önünde bulundurarak maksimum NBD'yi sağlayacak olan kazı sıralamasının bulunmasıdır (Dagdelen ve Johnson, 1986).

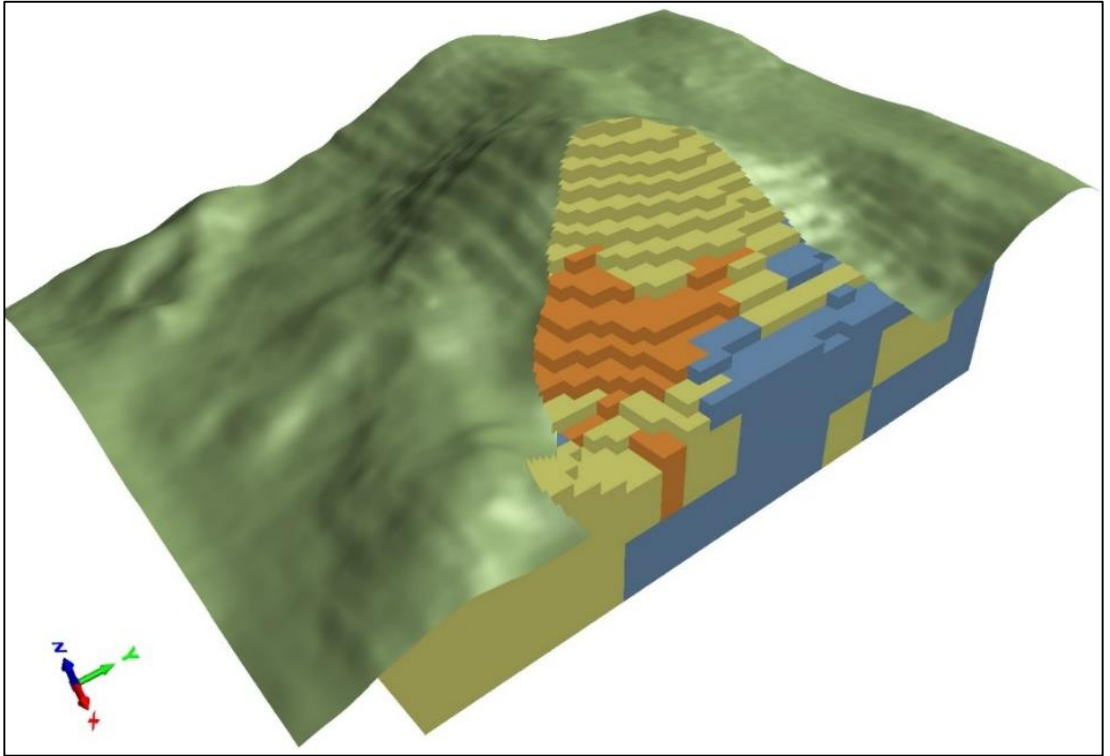
Açık işletmelerde üretim planlamasının zor bir işlem olduğu Whittle (1989) tarafından şöyle açıklanmaktadır: “Maksimum ocak değerini veren nihai sınırlar, blokların ekonomik değerleri bilinmeden bulunamaz. Blok ekonomik değerleri ise blok kazı sırasına karar verilmeden bilinemez. Blok kazı sırası ise ocak nihai sınırları belirlenmeden bulunamaz.”. İşte bu nedenle açık ocak işletmelerinde nihai sınır ve üretim planı optimizasyonu çözülmesi zor olan döngüsel bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu döngüsel problemin adım adım çözülebilmesi amacıyla genellikle; açık ocak nihai sınırlarının öncelikle tespit edilmesi daha sonra da bu sınırlar içerisinde üretim sıralamasının yapılması yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır (Caccetta ve Hill, 2003).

2.1 Genel Bilgiler

Bu bölümde madencilikte kullanılan bazı kavramlar, kullanımları ve optimizasyona etkileri kısaca anlatılmıştır.

2.1.1 Blok model

Bir blok model, cevher yatağının ve yanındaki diğer jeolojik formasyonların küçük bloklara ayrılmasıyla oluşur. Bloklar geometrik şekillerden oluşur. Örneğin 2 boyutlu bloklar kare veya dikdörtgen, 3 boyutlu bloklar küp veya dikdörtgenler prizması şeklindedir. Her bir blok, bulunduğu konumun jeolojik, fiziksel ve ekonomik özelliklerini temsil eder. Örnek bir blok model şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.1). Blok içeriğindeki hacim, rezerv, tenör gibi değişkenlerin kolaylıkla hesaplanabilmesi ve ekonomik değerlerin kolaylıkla elde edilebilmesi amacıyla blok model kullanımı tercih edilmektedir.

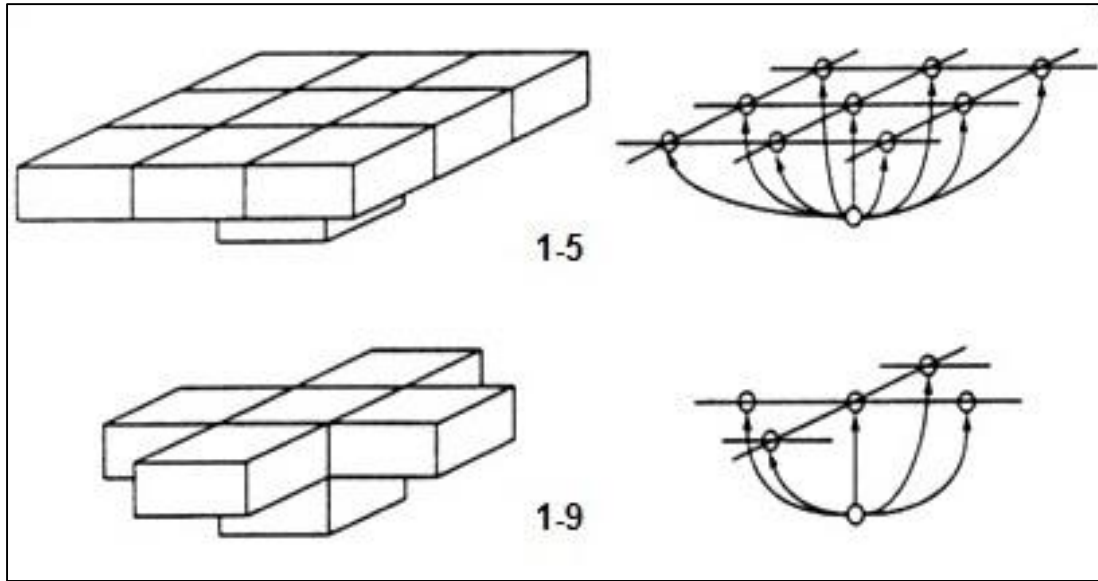


Şekil 2.1 : Örnek bir 3B blok model.

Nihai ocak sınırlarını belirlemeye yönelik çalışmalarda bir bloğu alabilmek için üzerindeki mevcut blokların da alınması gerektiği prensibi vardır. Örneğin 2B bir blok modelde bir bloğu çıkarabilmek için üzerindeki üç blok öncelikli olarak alınmalıdır. 3B uygulamalarda ise şekilde (Şekil 2.2) görüldüğü gibi bir bloğun çıkarılabilmesi için

üzerindeki beş blok veya dokuz bloğun çıkarılması gerektiği düşünülerek hesaplamalar yapılır (Hustrulid ve diğ., 2013).

Blok model, cevher yatağının boyutuna göre ve seçilen blok boyutlarına göre milyonlarca bloktan oluşabilir. Bir blok modelde bloklara atanan değişkenler, blokların çevresinde yer alan sondajlardan elde edilir. Optimizasyon çalışmalarında bloklara atanan değişkenlerden en önemli olanı tenör değerleridir. Tenör değerleri, özellikle bir bloğun cevher kazısı veya dekapaj kazısı olarak değerlendirilmesinde çok etkilidir. Ayrıca tenör değerleri bir bloğun ekonomik değerinin hesaplanmasında ve tesislere beslenecek cevher kalitesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bloklara tenör değerlerinin atanmasında en çok kullanılan yöntemler ağırlıklı ters mesafe yöntemi (Inverse distance weighting) ve jeostatistiksel yöntemlerdir. Bloklara tenör değerlerinin atanmasından sonra her bloğun ekonomik değeri belirlenebilir hale gelir (Erarslan, 1996).

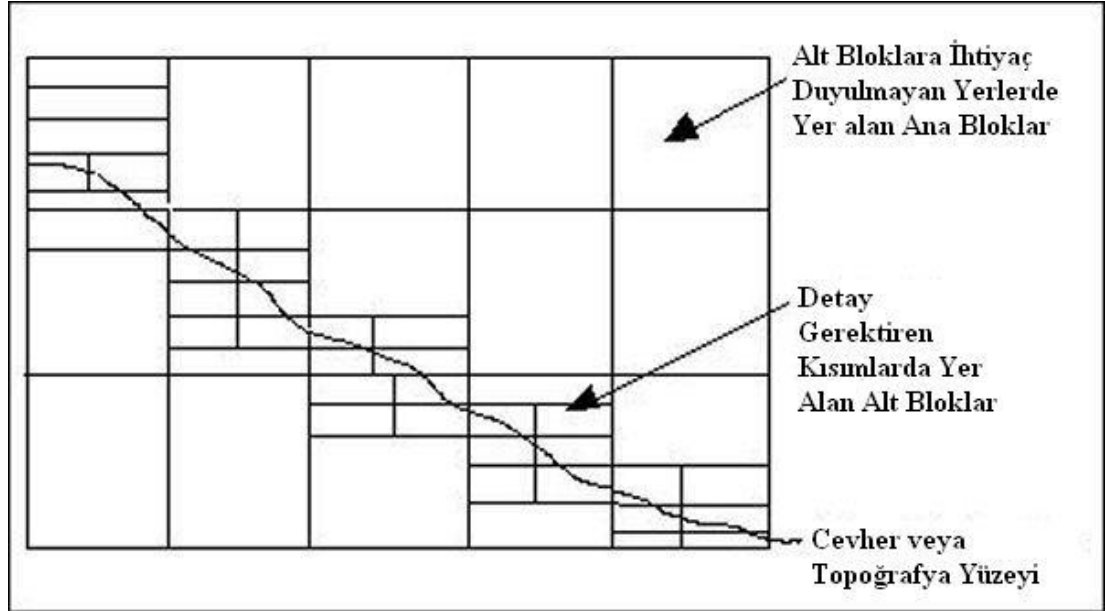


Şekil 2.2 : Blok kısıtlamaları için 1-9 ve 1-5 modellerinin temsili görünümü.

Blok boyutları kullanıcının ihtiyacına göre düzenli veya düzensiz olabilir. Boyutları düzenli olan bir blok modelde yer alan blokların her yönde (x, y, z) uzunlukları aynıdır. Bu nedenle birbirinin üzerinde yer alan blokların merkezleri, kenarları ve köşeleri her yönde eşit uzaklıktadır. Boyutları düzensiz olan blok modellerde ise farklı yönlerde farklı blok boyutları kullanılabilir. Düzensiz bir blok modelde ana bloklar ve alt bloklar bulunur. Ana bloklar, modelin genelinde kullanılan ve detay gerektirmeyen bölgelerde kullanılır. Alt bloklar ise, model içerisinde yer alan formasyon değişiklikleri sırasında geçişlerin daha detaylı olarak gösterilmesi, ani bölgesel

değişimlerin blok modele yansıtılabilmesi veya topoğrafya gibi düzeni olmayan yüzeylerin mümkün olduğunca uygun bir şekilde modellenenebilmesi için kullanılır. Ana blok ve alt blokları gösteren bir şekil aşağıda verilmiştir (Şekil 2.3).

Üretim planlaması için yapılan bilimsel araştırmaların bir kısmında düzenli blok model kullanılmış, bir kısmında da yöntemin zaten düzensiz blok modele uygun olmasından dolayı böyle bir ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak düzensiz blok model kullanımının uygulamada daha yaygın ve gerçekçi olmasından dolayı ticari yazılım şirketleri düzensiz bloklar üzerinde üretim planlaması yapan ticari yazılımlar sunmak zorundadır. Düzenli bir blok model üzerinde üretim planlaması yapılması durumunda ise blok model boyutlarının gerektiğinden daha küçük seçilmesi gereklidir. Ancak küçük blok boyutları kullanıldığında blok sayısı artacağından dolayı işlem sürelerinin katlanarak artması gibi bir dezavantaj ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.3 : Blok modelde kullanılan ana blok ve alt bloklar.

2.1.2 Blokların ekonomik değeri

Bir bloğun ekonomik değerini belirleyen temel parametreler maliyet ve gelirlerdir. Blok ekonomik değerlerinin hesaplanmasında kullanılan birim maliyet, benzer özellikteki ocaklar göz önünde bulundurularak, cevher satış fiyatı ise güncel fiyatlar kullanılarak bulunur. Bir cevher bloğuna verilen ekonomik değer, bloktan elde edilen gelirden madencilik ve zenginleştirme maliyetlerinin çıkarılmasıyla elde edilir. Bir dekapaj bloğunun ekonomik maliyet değeri ise sadece kazı, nakliye ve döküm maliyeti olarak düşünülebilir (Erarslan, 1996).

Bir bloğun ekonomik değeri genel olarak o bloğun getirisi ile maliyeti arasındaki farktır (Eşitlik (2.1)). Gelir, blok içerisindeki bir ya da birden fazla cevherin zenginleştirilip satılmasıyla elde edilir (2.2). Giderler ise bloğun içeriğine göre (cevher veya dekapaj) farklı işlemlere uğrayacağı için farklı maliyetler getirmektedir (2.5). Örneğin metal yataklarından elde edilen cevher kazı ve nakliye işlemlerinden sonra zenginleştirme işlemlerine tabi tutulurken dekapaj bloklarında ise sadece kazı ve nakliye gibi maliyetler bulunmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından blok ekonomik değerinin belirlenmesi konusunda formüller sunulmuştur. Genel olarak bir bloğun ekonomik değeri Whittle (1993) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir (Eşitlik (2.1)-(2.7)).

$$\text{Blok Ekonomik Değeri (BED)} = \text{Gelir} - \text{Gider} \quad (2.1)$$

$$\text{Gelir(TL)} = \text{SatışFiyatı} \left(\frac{\text{TL}}{\text{ton}} \right) \times \text{Konsantre Cevher(ton)} \quad (2.2)$$

$$\text{Konsantre Cevher(ton)} = \text{Tüvenan Cevher(ton)} \times \text{Tenör}(\%) \times \text{Kazanım}(\%) \quad (2.3)$$

$$\text{Tüvenan Cevher(ton)} = \text{Hacim(m}^3\text{)} \times \text{Yoğunluk} \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Gider(TL)} = & \text{Tüvenan Cevher(ton)} \times \text{Cevhere Özgü Maliyetler} \left(\frac{\text{TL}}{\text{ton}} \right) \\ & + \text{Dekapaj(m}^3\text{)} \times \text{Dekapaja Özgü Maliyetler} \left(\frac{\text{TL}}{\text{m}^3} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \text{BED} = & [\text{TüvenanCevher} \times \text{Tenör} \times \text{Kazanım} \times \{\text{KonsantreCevherSatışFiyatı} - \text{CevherSatışMaliyeti}\}] \\ & - [\text{TüvenanCevher} \times \text{Cevhere Özgü Maliyetler}] \\ & - [\text{Dekapaj} \times \text{Dekapaja Özgü Maliyetler}] \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{BED} = [V_c \cdot d_c \cdot g \cdot R \cdot \{P_c - CS_c\}] - [V_c \cdot d_c \cdot C_c] - [(V_d \cdot C_d)] \quad (2.7)$$

Bu formüllerde yer alan değişkenler aşağıda verilmiştir;

BED : Blok Ekonomik Değeri (TL)

V_c : Bloktaki Tüvenan Cevher Hacmi, (m³)

d_c : Ortalama Cevher Yoğunluğu, (ton/m³)

g : Ortalama Tenör, (%)

R : Konsantre Kazanım Yüzdesi, (%)

P_c : Konsantre Cevher Satış Fiyatı, (TL/ton)

CS_c : Konsantre Cevher Satış Maliyeti (Vergiler, Satış ve Pazarlama Maliyetleri)
(TL/ton)

C_c : Cevhere Özgü Maliyetler (Kazı, Nakliye, Hazırlama, Zenginleştirme),
(TL/ton)

V_d : Dekapaj Hacmi, (m³)

C_d : Dekapaja Özgü Maliyetler (Kazı-Nakliye vs.), (TL/m³)

Bu değişkenlere ilaveten kazılacak malzemenin derinliğine bağlı olarak taşıma maliyetleri değişebileceği için basamakların derinliğine bağlı olarak maliyetlerde de değişim olabilmektedir. Birçok madencilik yazılımında farklı basamaklar için farklı maliyet değerleri girilebilmektedir. Böylece daha derinde yapılacak blok kazı ve taşıma işlemlerinin işletmeye getirmiş olduğu maliyet artışı da hesaplamalara katılmış olur.

2.1.3 Net bugünkü değer ve nakit akışı

Net bugünkü değer, gelecekte elde edilecek olan gelir veya giderin bugünkü zamana ait karşılığı olarak tanımlanabilir. Özellikle uzun süreç gerektiren projelerde NBD'nin hesaplanması büyük önem arz etmektedir. Bu sayede farklı projelerin arasında daha sağlıklı kararlar verilebilmektedir. Uzun vadeli açık ocak üretim planlaması problemlerindeki amaçlardan biri de ocaktan elde edilecek net bugünkü değerini maksimize edilmesidir. Herhangi bir projede zamana göre gelir ve giderlerin hesaplanmasından sonra net bugünkü değer toplamının sıfırdan büyük çıkmaması durumunda projenin kazançlı olmadığı söylenebilir. NBD'nin pozitif çıkması o işletmenin ekonomik açıdan kazanca sahip olacağı manasına gelir. Bir para akışının NBD'sini bulmaya yarayan formül aşağıdaki gibidir (2.8).

$$NBD = \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (2.8)$$

Burada;

NBD : Net bugünkü değer

i : İskonto oranı (%)

t : Dönem, $t = 1, 2, 3, \dots, N$

R_t : t döneminde gerçekleşen net para akışı (gelir ve gider)

Örnek olarak; yıllık %10 iskonto ile 1 yıl sonraki 100 TL'nin bugünkü değeri;

$$NBD = \frac{100}{(1+0.1)^1} = 90,0909 \text{ TL olarak bulunur.}$$

Nakit akışı (cash flow) ise projede belirli zaman periyotlarında oluşan net gelir ve giderlerdir. Örnek olarak aşağıdaki nakit akışı tablosu verilebilir (Çizelge 2.1). Tabloda görüldüğü gibi ilk yatırım maliyeti 200 TL olan bir projenin 6 yıl sonunda gelir ve giderleri hesaba katıldığında kazancının +300 TL olduğu gözükmemektedir. Ancak burada paranın zaman değeri diğer bir deyişle yıllık iskonto oranı da hesaba katıldığında projenin bugünkü değeri hakkında bilgi sahibi olunabilir. Paranın zaman değerinin hesaba katılmadığı gelir ve gider akışlarına; iskonto edilmemiş nakit akışı (undiscounted cash flow) denilir.

Çizelge 2.1 : Basit bir nakit akışı örneği (Stermole ve Stermole, 1974).

Gelir ve Gider	0. Yıl	1. Yıl	2. Yıl	3. Yıl	4. Yıl	5. Yıl	6. Yıl
Gelirler			+170	+200	+230	+260	+290
- İşletme Maliyetleri			-40	-50	-60	-70	-80
- İlk Yatırım Maliyetleri	-200	-100					
- Vergiler			-30	-40	-50	-60	-70
Proje Nakit Akışı	-200	-100	+100	+110	+120	+130	+140
Kazanç	-200	-300	-200	-90	+30	+160	+300

Nakit akışı tablosundaki değerlerin yıllık iskonto oranları ile hesaplanmış hali iskonto edilmiş nakit akışını verir (discounted cash flow). Yıllık %15 iskonto için aşağıdaki hesaplamaların yapılmasıyla projenin bugünkü değeri bulunmuş olur.

$$NBD = -200 + \frac{-100}{(1,15)^1} + \frac{100}{(1,15)^2} + \frac{110}{(1,15)^3} + \frac{120}{(1,15)^4} + \frac{130}{(1,15)^5} + \frac{140}{(1,15)^6} = 55,75 \text{ TL}$$

Yukarıda da görüldüğü gibi projenin net bugünkü değeri 55,75 TL'dir. Net bugünkü değer hesaplanabilmesiyle farklı projeler arasında hangisinin daha kazançlı olduğu konusunda kararlar verilebilmektedir.

2.1.4 İç içe ocaklar serisi ve faz tasarımı

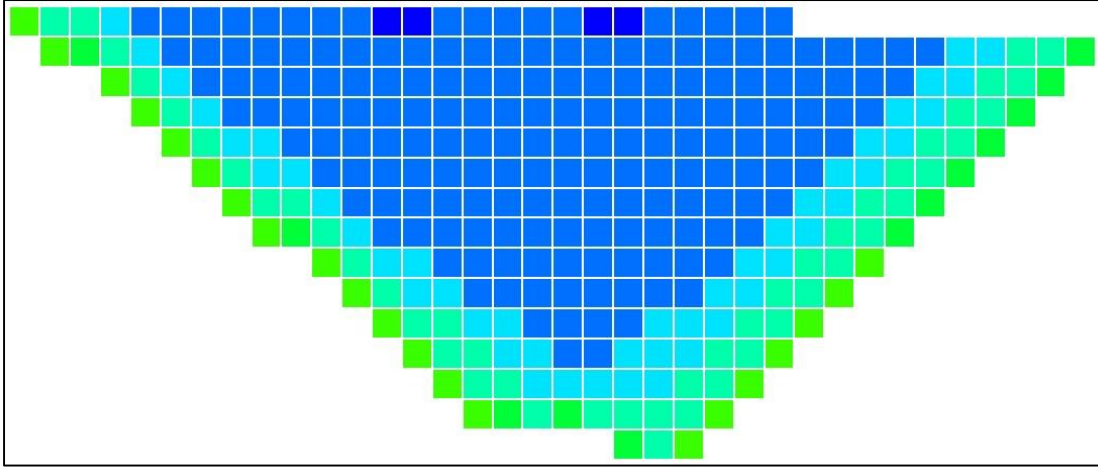
Açık ocaklarda üretim planlaması geleneksel olarak aşağıdaki üç aşama sonucu ortaya çıkar (Gaupp, 2008);

- 1- Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesi
- 2- İç içe ocaklar serisi (nested pits, pit shells) ve faz (phase, pushback) tasarımlarının oluşturulması
- 3- Blok kazı sıralamasının belirlenmesi

İç içe ocaklar serisi, kazılan cevherin satış fiyatının veya net kazancın kademeli olarak artırılması ve bu değerlerle nihai sınırların bulunması ile elde edilir (Şekil 2.4). Maden planlayıcısı tarafından öncelikle temsili bir cevher satış fiyatı seçilir ve bu fiyatlarla hangi bloğun alınıp hangi bloğun alınmayacağına karar verilir. Bu fiyatlarla bulunan nihai ocak sınırları iç içe ocak serisinin başlangıcı olarak kaydedilir. Daha sonra maden planlayıcısı temsili cevher satış fiyatını yükseltir ve bir önceki nested pit dışında kalan bloklardan hangilerinin ocaktan çıkarılabileceği belirlenir. Bu bloklar ikinci iç içe ocak olarak kabul edilir. Bu işlemler cevher bloklarının tamamı incelenip alınıncaya kadar ve daha başka alınabilecek iç içe ocak kalmayıncaya kadar devam eder.

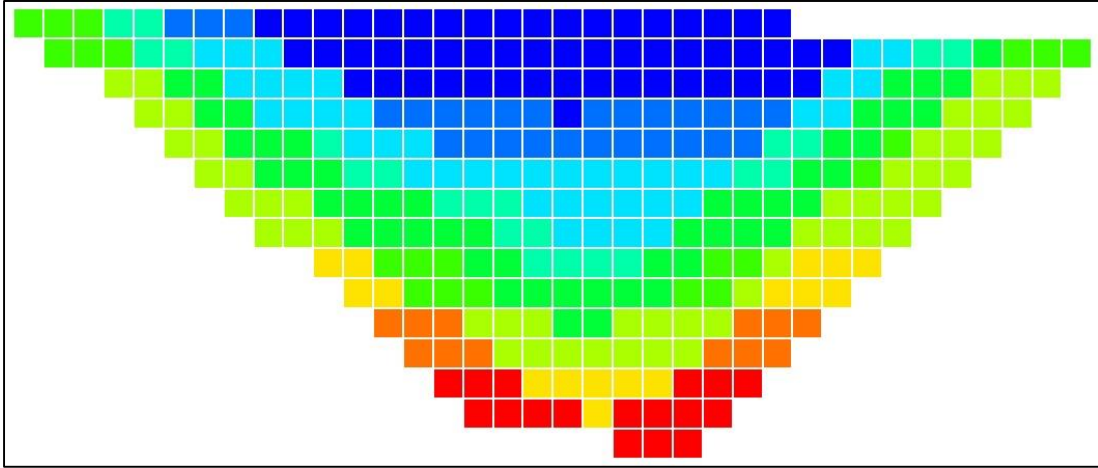
İç içe ocak serisi içerisinde yer alan en dıştaki ocak sınırları, kazılan bloklar ile kazılmadan bırakılan blokları birbirinden ayırır. Burada önemli olan nokta, kazılan her bloğun bireysel olarak düşünüldüğünde kârlı olmadığı gerçeğidir. Bir blok çıkarılmışsa ya kendisi ocağın toplam kazancına katkıda bulunuyordur ya da altındaki daha değerli bloklara ulaşmak için kazılması gerekiyordur.

Faz (phase, pushback) tasarımı açık ocak işletmelerinde uzun dönem üretim planlaması için atılacak önemli adımlardan biridir (Şekil 2.5). Maden planlayıcısı, birbirine komşu olan iç içe ocakları; üretim hedeflerine, öğütme tesisine beslenecek miktara ve diğer işletme kısıtlarına bağlı olarak gruplandırır ve fazlar haline getirir. Her bir faz işletmenin belirli bir dönemde kazılması gereken bloklar kümesini belirtir ve üretim planlamasının daha detaylı ayrıntıları için yol göstericidir.



Şekil 2.4 : İç içe ocaklar serisi.

İç içe ocaklar serisi fazlar haline getirilmediği zaman ocak boyutları arasındaki düzensiz artışlar dönemlik ihtiyaçlardan çok farklı olabilmektedir. Fazlar belirlendikten sonra her faz içerisinde ayrı olarak blok kazı sıralaması belirlenmeye çalışılır ve ocağın bütün ömrü boyunca kazılacak blokların sıralaması belirlenmiş olur.



Şekil 2.5 : Dönemlik üretim miktarına göre düzenlenmiş faz tasarımı.

Uzun vadeli üretim planlamasında faz tasarımı yapılmasının avantajlarından biri ocak şev açılarının her adımda korunabilmesidir.

2.2 Açık İşletmelerde Nihai Sınırların Belirlenmesi

Açık ocak nihai sınırlarını belirlemek için kullanılan yöntemlerde öncelikli amaç; ocak sınırları içerisindeki blokların toplam ekonomik değerlerinin maksimize edilmesidir. Bu amaçla 1965’li yıllardan günümüze kadar yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan önemli olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

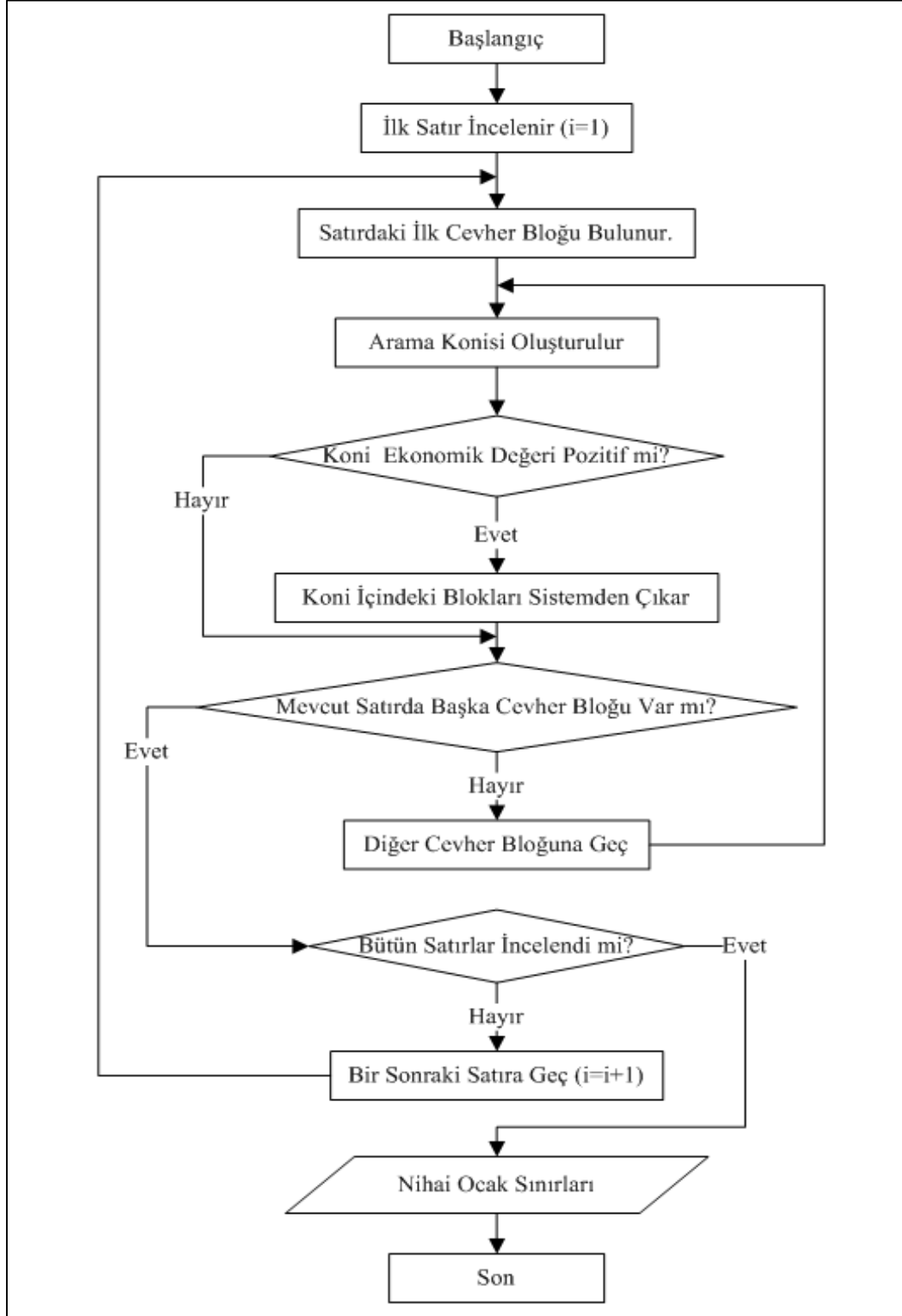
- Dinamik Programlama (Dynamic Programming), Lerchs ve Grossmann (1965)
- Hareketli Koniler Yöntemi (Moving Cone or Floating Cone), Pana (1965)
- Grafik Teorisi (Graph Theory), Lerchs ve Grossmann (1965)
- Maksimum Akış Algoritması (Maximum Flow Algorithm), Johnson (1968)
- Doğrusal Programlama (Linear Programming), Meyer (1969)
- Ulaştırma Algoritması (Transportation Algorithm), Huttagosol ve Cameron (1992)
- Genetik Algoritması (Genetic Algorithm), Denby ve Schofield (1994)

Günümüzde optimum sonucu vermesi açısından en çok kullanılan yöntem, ilk olarak Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından kullanılan Dinamik Programlama ve Grafik Teorisi'dir. Bu algoritmaları kullanım kolaylığı açısından Maksimum Akış Algoritması (Johnson, 1968) ve Hareketli Koni yöntemi (Pana, 1965) takip eder. Bu dört yöntemden Grafik Teorisi ve Hareketli Koni yöntemi açık ocak nihai sınırlarını bulmak amacıyla birçok madencilik programında (Micromine, Surpac, Vulcan, NPV Scheduler) tercih edilmektedir. Aşağıda bu dört yöntemin nasıl uygulandığı konusunda bilgiler verilmiştir.

2.2.1 Hareketli koni yöntemi

Açık ocak nihai sınırlarının bulunmasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan hareketli koni yöntemi ilk olarak Pana (1965) tarafından kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanırken uç kısmı aşağıya bakan bir arama konisi kullanılır. Koninin aşağıya bakan uç kısmı, pozitif ekonomik değere sahip blok veya blok kümelerini bulmak amacıyla cevher blok modelindeki her bloğun merkezinde konumlanır. Bu koni, aslında ocağın şev açılarını temsil etmektedir. Kullanılan koni en üst ve sol sıradaki bloktan başlayarak her bir cevher bloğu üzerinde durarak koninin içerisinde kalan blokların ekonomik değerlerini hesaplar. Eğer koni içerisinde kalan blok veya blokların ekonomik değeri pozitif ise bu blok veya blokların ekonomik ocak sınırları içerisinde yer alması gerektiği düşünülür. Mevcut koni, bütün cevher blokları üzerinde hareket ettikçe pozitif değeri veren blok veya blok kümeleri sistemden çıkarılır ve nihai ocak sınırlarını oluşturan blok veya bloklar olarak kaydedilir. Böylece bütün

cevher blokları üzerinde deneme yanılma yoluyla analiz yapılmış olur. Yöntemin akış şeması şekilde (Şekil 2.6) verilmiştir (Wright, 1990).



Şekil 2.6 : Hareketli koni yönteminin akış şeması.

Her ne kadar uygulanması kolay bir yöntem de olsa kesişen konilerin hesaba katılmaması ve bütün blok kombinasyonlarının değerlendirilememesi gibi problemler bu yöntemin optimum nihai ocak sınırlarını vermesine engel olur. Lemieux (1979) sezgisel bir yöntem sayesinde kesişen konilerin hesaba katılabileceğini belirtmiştir. Lizotte (1988) ise bu önerinin her koşulda optimum sonuçları verip vermeyeceğinin kanıtlanması gerektiğini belirtmiştir.

2.2.2 Dinamik programlama

Dinamik programlama, açık ocak nihai sınırlarının bulunması amacıyla ilk defa Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından kullanılmıştır. Lerchs ve Grossmann (1965) öncelikle 2B kesitler üzerinde hesaplamalar yapmış daha sonra bu kesitleri 3B ocak oluşturmak amacıyla bir araya getirmişlerdir.

2B bir kesit (Şekil 2.7) üzerinde algoritmanın temel adımları şöyle özetlenebilir (Lerchs ve Grossmann, 1965);

- I. Adım: ijk koordinat sisteminde (Şekil 2.7a); i no'lu kesitte, j no'lu sütun ve k seviyesi için, m_{ijk} , bir bloğun ekonomik değerini temsil etmektedir.
- II. Adım: Her ijk bloğu için yukarıdan başlayarak aşağıya doğru ekonomik değerler toplanarak aynı bloğa yazılır (Eşitlik 2.9, Şekil 2.7b).

$$M_{ijk} = \sum_k m_{ijk} \quad (2.9)$$

- III. Adım: Sütunların en soluna $j=0$ blokları, satırların üzerine de $k=0$ blokları eklenir (Şekil 2.7c). Sonradan eklenen bu blokların değerleri sıfırdır.
- IV. Adım: En sol üst köşedeki bloktan başlanarak P_{jk} değerleri bulunur (i sabit). P_{jk} değeri bir bloğun solunda yer alan üç komşu bloğun incelenmesiyle ortaya çıkar. Bu üç blok içerisinde ekonomik değeri en büyük olan blokla incelenen bloğun değeri toplanır. Ardından değeri büyük olan bu bloğa doğru bir ok çizilir (Eşitlik 2.10, Şekil 2.7c).

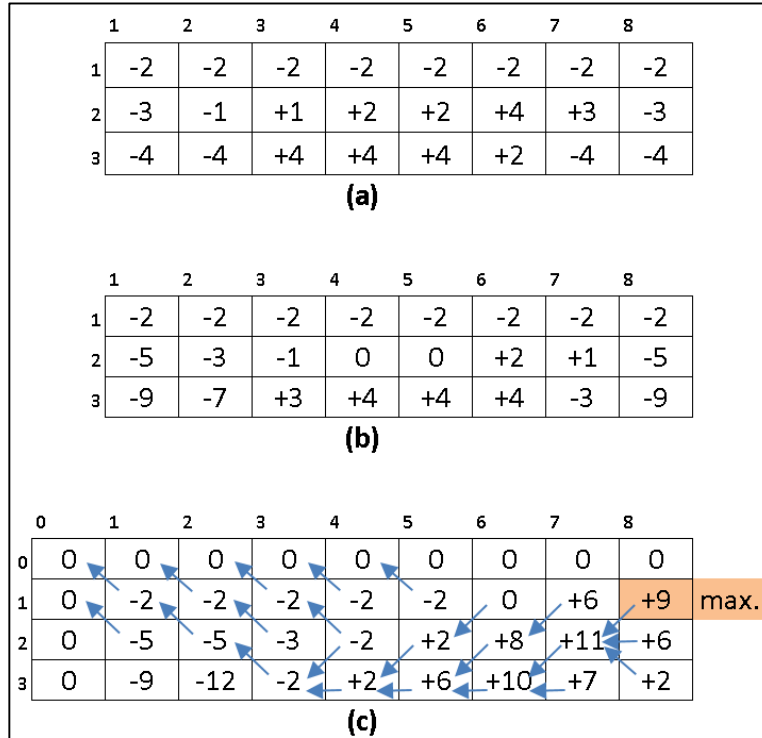
$$P_{jk} = M_{jk} + \max(P_{j-1,k-1}, P_{j-1,k}, P_{j-1,k+1}) \quad (2.10)$$

- V. Adım: Bütün bloklar incelendikten sonra $k=1$ seviyesindeki P_{max} değeri bulunur ve bu değer iki boyutlu kesit için maksimum ocak değerini verir

(Eşitlik 2.11, Şekil 2.7c). Bu bloktan başlanarak ok işaretlerinin gösterdiği bloklar takip edilir. Bu bloklar, incelenen kesit için nihai sınırları gösteren bloklardır. Eğer $k=1$ seviyesinde pozitif değerli bir blok yoksa işletme kazancını arttırabilecek bir üretim mevcut değil demektir.

$$P_{max} = \text{Max} P_{ij} \quad (2.11)$$

Dinamik programlama yöntemi, kolay anlaşılabilirliği ve bilgisayar ortamında kolay kodlanabilirliği nedeniyle sıklıkla kullanılan ve uygulanan bir yöntem olmuştur. Bu yöntem, 2 boyutlu kesitlerde hızlı bir şekilde ve kesin doğrulukta sonuçlar vermesine rağmen 2 boyutlu kesitten 3 boyutlu ocak oluşumuna geçişte uyumsuzluk sorunları oluşturmuş ve daha sonra bu sorun üzerine değişik algoritmalar geliştirilmiştir (Johnson ve Sharp (1971), Koenigsberg (1982)). Bu yöntemler de nihayetinde orijinal Lerchs ve Grossmann (1965) algoritmasına dayanmaktadır. 2B kesitler üzerinden 3B aşamaya geçerken kesitler üzerindeki nihai sınırların birbiriyle uyumsuz olmasından kaynaklanan sorunlar, bu çalışmalar sayesinde giderilebilse de bazen optimum olmayan sonuçlar vermesini engelleyememektedir. Bu tarz yaklaşımlar problemi azaltma konusunda işe yarsa da, tamamen ortadan kaldırma açısından yeterli değildir (Erarslan, 1996).



Şekil 2.7 : Lerchs ve Grossmann dinamik programlama algoritması.

Koenigsberg (1982) yöntemin 3 boyutta daha kullanışlı olabilmesi için algoritmanın yapısında küçük bir değişiklik yapmış ve P_{jk} değerinin hesabında bir yandaki kesiti de hesaba katmıştır. Ancak bu yaklaşımda da 3 boyutlu bir ocakta, 2 boyutlu kesit üzerinde çalışılması mantığı devam etmiştir. Wright (1987), Koenigsberg (1982) yöntemini tekrar elden geçirmiş ancak optimum ocak sınırlarına daha çok yaklaşımdan ziyade çözümün daha hızlı yapılabilmesini garanti etmiştir.

2.2.3 Maksimum akış algoritması

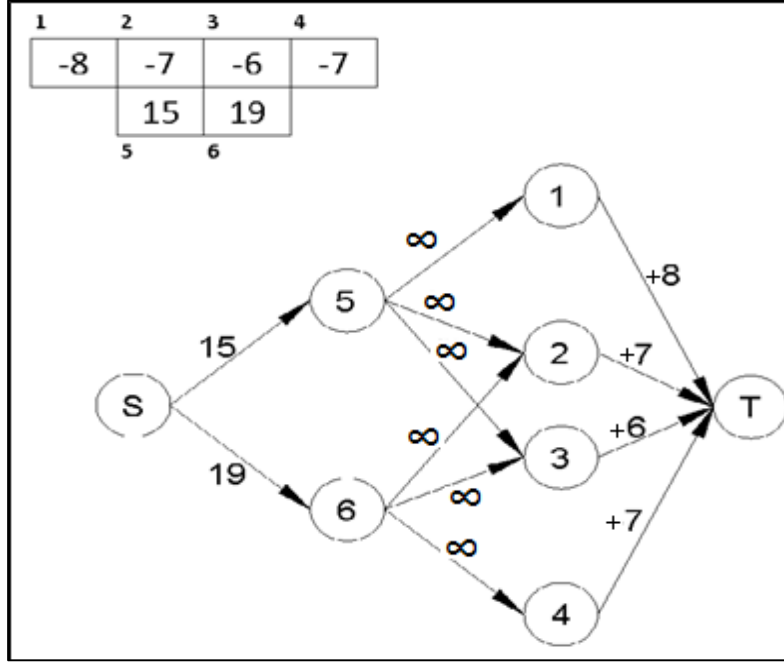
Bu algoritma, Ford ve Fulkerson (1956) tarafından ağ problemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiş ve madencilik alanında ilk olarak Johnson (1968) tarafından kullanılmış ve daha sonra Barnes (1982) tarafından başarıyla uygulanmıştır. Yegulalp ve Arias (1992) ağ akış modellerini maksimize eden birçok algoritmayı, yayınladıkları makalede sıralamışlardır.

Bir ağ (network), düğüm noktaları (nodes), arklar (arcs) ve bu arklara atanmış olan ve kapasite denilen değerlerden oluşur. Şekilde (Şekil 2.8) tipik bir ağ modelini göstermektedir. Böyle bir ağ modeli aşağıdaki adımlar takip edilerek çözülebilir (Ataee-Pour, 2000).

1. Ağ modelinde her blok bir düğüm noktası tarafından temsil edilir.
2. İki yapay düğüm noktası ağ modeline eklenir. Bunlar kaynak (source) ve terminal (sink) olarak isimlendirilir.
3. Pozitif bloklara karşılık gelen düğüm noktalarına kaynak düğüm noktasından çıkan arklar yönlendirilir. Buradaki her arkın akış kapasitesi temsil ettiği bloğun ekonomik değeri kadardır.
4. Negatif veya sıfır değerli düğüm noktalarından terminal düğüm noktasında doğru arklar oluşturulur. Bu arkların kapasiteleri ise blokların negatif değerlerinin mutlak değerleri kadardır.
5. Pozitif düğüm noktalarından, negatif veya sıfır değerli düğüm noktalarına doğru arklar oluşturulur. Burada önemli olan kısım herhangi bir pozitif bloğun alınabilmesi için hangi pozitif olmayan blokların alınması gerektiğinin arklarla gösterilmesidir. Bu arkların kapasiteleri ise sonsuzdur.

Bu ağ modelinde amaç; kaynak noktasından (S) terminal noktasına (T) olan akışı maksimize etmektir. Sonuç olarak; elde edilen ağ içerisinde etiketlenmiş olan düğüm

noktalarının (blokların) kazılması, etiketlenmemiş olanların ise bırakılmasıyla açık işletme nihai sınırları elde edilmiş olacaktır.

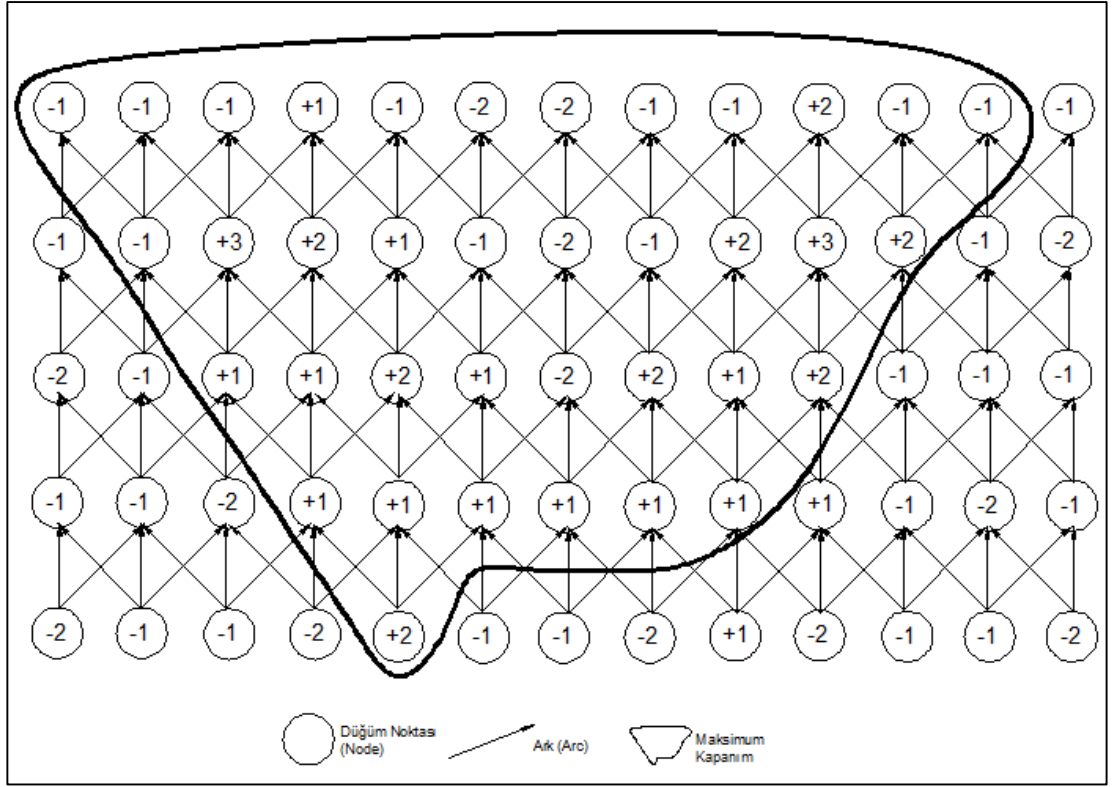


Şekil 2.8 : Temsili bir maksimum akış algoritması.

2.2.4 Grafik teorisi

Dinamik programlama yönteminin 3 boyutlu uygulamalarda yetersiz kalmasından dolayı Lerchs ve Grossmann (1965) açık ocak nihai sınırlarının bulunmasında grafik teorisinin kullanılabilirliğini kanıtlamışlardır.

Grafik teorisinde amaç, yönlendirilmiş–ağırlıklandırılmış arklar (directed–weighted arcs) ile maksimum kapanımı (maximum closure) veren blokları elde etmektir. Bloklar düğüm noktaları olarak temsil edilir. Düğüm noktaları arasındaki yönlendirilmiş arklar (directed arcs), bloklar arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu arklar bir blok çıkarılmadan önce üzerindeki hangi blokların çıkarılması gerektiğini belirtir. Arklar bazı etiketleme (labelling) işlemlerinden geçirilir. Bu süreç belli kurallar çerçevesinde yapılır ve normalleştirme (normalization) olarak adlandırılır. Normalleştirme işlemleri, kök düğüm noktasına (dummy root) bağlı güçlü dal (strong branch) kalmayıncaya kadar devam eder. Bu işlemler sonucunda elde edilen maksimum kapanım içerisinde kalan bloklar nihai sınırlar içerisinde kalan bloklardır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Grafik teorisinde maksimum kapanım.

Grafik teorisi optimum nihai sınırları hatasız olarak verdiği için daha sonra yapılan diğer çalışmalar yöntemin uygulanmasına veya daha hızlı çalışmasına yöneliktir (Lipkewich ve Borgman (1969), Chen (1976), Huttagosol (1988), Whittle (1988), Zhao ve Kim (1992)).

Bu yöntem her zaman optimum sonucu vermeyi garanti etmesine rağmen yöntemin karmaşıklığı, hesaplama zamanı ve farklı şev açılarının uygulanabilmesinin zorluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır (Khalokakaie, 1999).

2.2.5 Mevcut çalışmaların değerlendirilmesi

Yukarıda detayları verilen 4 yöntemin genel olarak avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir;

- Grafik Teorisi ve Ağ Akış Algoritması, diğer yöntemlere göre kesin doğruluktadır ve optimum nihai sınırları vermektedir. Bu iki yöntem de farklı şev açlarına uyum sağlayabilmektedir.
- Grafik Teorisi, diğer yöntemlere göre anlaşılması, uygulaması ve programlanması zordur.

- Grafik Teorisi, geçmişte bilgisayar uygulamalarında işlemci ve hafıza açısından yetersiz kalmaktaydı ancak günümüz bilgisayarlarıyla milyonlarca blok içeren bir cevher yatağında rahatlıkla uygulanabilmektedir. Micromine, Surpac, Vulcan ve Datamine gibi sık kullanılan tasarım programlarının hemen hepsinde Grafik Teorisi Yöntemi kullanılmaktadır.
- Ağ Akış Algoritması her zaman optimum çözümü garanti etmekte fakat 3B büyük problemlere uygulanması, programlanması ve çözüm zamanı açısından güçlükleri olması nedeniyle bir çok maden tasarım programı tarafından tercih edilmemektedir.
- Dinamik Programlama yöntemi, kullanımı kolay ve uygulanması hızlıdır.
- Dinamik Programlama yöntemi, 2B modellerde doğru sonuçlar vermekle birlikte bazen 3B uygulamalarda optimum sonuçları verememektedir.
- Hareketli koni yöntemi, diğer yöntemlere göre anlaşılması, kullanılması ve programlanması açısından çok kolaydır. Bilgisayar programları üzerinde hızlı bir şekilde çalışabilmektedir.
- Hareketli Koni Yönteminin dezavantajı ise 2 farklı kusurunun bulunmasıdır. Bunlar; farklı konilerin kesişiminden oluşan ekonomik değerlerin hesaplanamaması ve koninin şeklinden dolayı pozitif değerli kombinasyonların fark edilememesi ayrıca pozitif değerli blok kümesinin içerisinde alınmaması gereken negatif değerli blokların da alınıyor olmasıdır.

2.3 Açık İşletmelerde Üretim Planlamasının Uygulanması

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması amacıyla geliştirilmiş birçok matematiksel model bulunmaktadır. Bu matematiksel modellerin dışında optimum sonuca ulaşmak amacıyla geliştirilmiş olan daha uygulanabilir pratik yaklaşımlar ve algoritmalar mevcuttur.

2.3.1 Üretim planlaması için kullanılan matematiksel modeller

Açık ocaklarda üretim planlamasında kullanılan matematiksel modeller üretim planının optimize edilmesi için gerekli olan amaç fonksiyonu, değişken ve kısıtları içermektedir. Bu matematiksel modeller aşağıda yer almaktadır.

2.3.1.1 Doğrusal programlama

Doğrusal programlama, Johnson (1969) tarafından üretim planlamasını optimize etmek amacıyla ilk defa kullanılmıştır. Matematiksel formülü aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Osanloo ve diğ., 2008);

Amaç fonksiyonu;

$$\text{Max } Z = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N C_i^{tm} \cdot TB_i \cdot x_i^{tm} \quad (2.12)$$

Kısıtlar;

$$G_{min}^{tm} \leq \left(\sum_{i=1}^N g_i \cdot TB_i \cdot x_i^{tm} \right) / \left(\sum_{i=1}^N TB_i \cdot x_i^{tm} \right) \leq G_{max}^{tm} \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ ve} \quad (2.13)$$
$$m = 2, 3, \dots, M$$

$$PC_{min}^{tm} \leq \sum_{i=1}^N TB_i \cdot x_i^{tm} \leq PC_{max}^{tm} \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ ve } m = 2, 3, \dots, M \quad (2.14)$$

$$MC_{min}^t \leq \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M TB_i \cdot x_i^{tm} \leq MC_{max}^t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.15)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M x_i^{tm} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.16)$$

$$\sum_{m=1}^M x_b^{tm} - \sum_{r=1}^t \sum_{m=1}^M x_l^{rm} \leq 0 \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ ve } b \quad (2.17)$$
$$= 1, 2, \dots, N \text{ ve } \forall l \in \Gamma_b$$

$$0 \leq x_i^{tm} \leq 1 \quad t = 1, 2, \dots, T \text{ ve } b = 1, 2, \dots, N \text{ ve } m = 1, 2, \dots, M \quad (2.18)$$

Burada:

$T =$ Maksimum t dönemi

$N =$ Sıralanması gereken toplam blok sayısı

$i =$ Blok indeksi ($i = 1, 2, \dots, N$)

$C_i^{tm} =$ proses türü m olduğunda, t dönemi içerisinde, i bloğundaki malzemenin birim ağırlığının kazılmasıyla oluşan net bugünkü değeri (NBD)

$x_i^{tm} =$ proses türü m olduğunda, t dönemi içerisinde, kazılacak i bloğunun oranı

$g_i =$ i bloğunun ortalama tenörü

$TB_i =$ i bloğundaki malzemenin toplam tonajı

$G_{max}^{tm} =$ t dönemi içerisinde, değirmene gönderilen m tipi malzemenin maksimum ortalama tenörü

$G_{min}^{tm} =$ t dönemi içerisinde, değirmene gönderilen m tipi malzemenin minimum ortalama tenörü

$PC_{max}^{tm} =$ herhangi bir dönemde, m tipi malzemenin maksimum proses kapasitesi

$PC_{min}^{tm} =$ herhangi bir dönemde, m tipi malzemenin minimum proses kapasitesi

$MC_{max}^t =$ herhangi bir dönemde maksimum kazı kapasitesi

$MC_{min}^t =$ herhangi bir dönemde minimum kazı kapasitesi

$b =$ t döneminde kazılması düşünülen bir bloğun indeksi

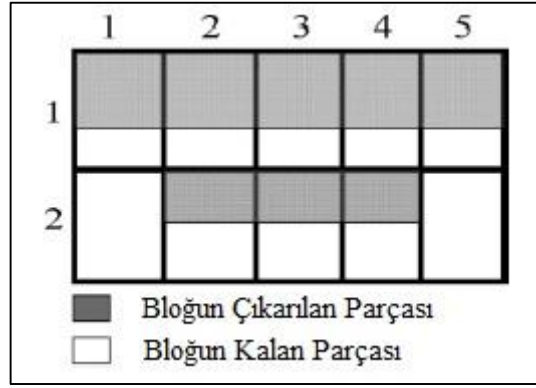
$m =$ malzeme türü veya işlem türü (örneğin atık=1, cevher=2, ... = M)

$\Gamma_b =$ b bloğu için tanımlanan blok kazı seti (bu set içerisindeki bloklar b bloğunun çıkarılmasından önce kazılması gereken bloklardan oluşur ve ayrıca maksimum ocak şev açısını da göz önünde bulundurur)

$l =$ sayaç ($l \in \Gamma_b$)

Bu model; paranın zaman değerini, farklı proses türlerini ve dinamik sınır tenör oranını göz önünde bulundurabilmektedir. Bu doğrusal programlama modeli aslında oldukça büyük ve çok dönemli (multi-period) üretim planlaması problemidir. Bu büyük ana problemi çözebilmek için Dantzig-Wolf ayrıştırma ilkeleri kullanılır ve ana problem (master problem) alt-problemler (sub-problem) haline getirilir. Her alt-problem, kendi içinde tek dönemlik (single-period) bir problem olarak ele alınır ve optimum nihai

sınırları bulunur. Nihai sınırları bulmak için maksimum ağ akış algoritması kullanılabilir. Bütün alt-problemler çözüldükten sonra artık ana-problemi çözebilmek göreceli olarak daha kolaydır. Johnson (1969) tarafından önerilen bu yöntem, her alt-problemden optimum sonuçları vermesine rağmen uzun vadeli üretim planlaması problemini tamamen çözememektedir. Bunun nedenlerinden biri 0 ve 1 değerleri arasında çıkan küsuratlı sonuçlardır. Ayrıca bu modelle yöntem uygulandığında, üzerindeki blokların alınmadan bloğun kendisinin bir kısmının alındığı durumlar oluşturmaktadır. Bu dezavantaj başka blokların altında kalan bir bloğun bir kısmının hava bloğu olarak gözükmesine neden olmaktadır (Şekil 2.10). Bu modelin diğer bir dezavantajı da her blok için 9 şev açısı değişkeni bulunmasıdır. Bu nedenle çözüme ulaşabilmek için blok sayısının sınırlandırılması ihtiyacı oluşur (Osanloo ve diğ., 2008).



Şekil 2.10 : Kısmi blok kazısı problemi.

Gershon (1983) doğrusal programlamanın dezavantajını ortadan kaldırmak amacıyla bir karışık tamsayı programlama modeli önermiştir. Bu sayede, üzerindeki blok tamamen alınmadan alttaki bloğun alınması hatasına çözüm bulunmuştur.

2.3.1.2 Karışık tamsayı programlama

Gershon (1983) tarafından üretim planlamasının çözümü için bir karışık tamsayı programlama modeli tavsiye edilmiştir. Karışık tamsayı programlaması için genel formül Caccetta ve Hill (2003) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir;

Amaç fonksiyonu;

$$Max Z = \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^N (c_i^{t-1} - c_i^t) x_i^{t-1} + \sum_{i=1}^N c_i^T x_i^T \quad (2.19)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{i \in O} t_i x_i^1 - m^1 = 0 \quad (2.20)$$

$$\sum_{i \in O} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) - m^t = 0, \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (2.21)$$

$$\sum_{i \in W} t_i x_i^1 \leq u_w^1 \quad (2.22)$$

$$\sum_{i \in W} t_i (x_i^t - x_i^{t-1}) \leq u_w^t, \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (2.23)$$

$$x_i^{t-1} \leq x_i^t, \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (2.24)$$

$$x_i^t \leq x_j^t, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad j \in S_i; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.25)$$

$$l_0^t \leq m^t \leq u_0^t, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.26)$$

$$x_i^t = 0, 1, \quad \forall i, \forall t \quad (2.27)$$

Burada;

T : üretim planı yapılacak periyot sayısı

N : cevher katı modelinde yer alan toplam blok sayısı

c_i^t : i bloğunun t periyodunda kazılmasıyla elde edilen kazanç

O : cevher blokları kümesi

W : dekapaj blokları kümesi

t_i : i bloğunun tonajı

m^t : t periyodunda zenginleştirilen cevherin tonajı

S_i : i bloğu kazılmadan önce çıkarılması gereken blokların kümesi

$x_i^t = \begin{cases} 1, & i \text{ bloğu alınırsa} \\ 0, & \text{aksi takdirde} \end{cases}$

l_0^t : t periyodunda zenginleştirilen minimum cevher miktarı

u_0^t : t periyodunda zenginleştirilen maksimum cevher miktarı

u_w^t : t periyodunda kazılan maksimum dekapaj miktarı

Yukarıdaki formülasyonda NBD'yi maksimize etmeyi hedefleyen amaç fonksiyonu Eşitlik (2.19) da verilmiştir. Eşitlik (2.20), (2.21) ve (2.26) cevher hazırlama tesisi kapasitesi kısıtlarıdır. Eşitlik (2.22) ve (2.23) ise önceden belirlenmiş olan dekapaj kazısı tonajının üst sınırıdır. Eşitlik (2.24), bir bloğun sadece bir defa kazılması için gereken kısıt olarak verilmiştir. Eşitlik (2.25) ise şev açısı kısıtıdır.

Bu formülasyonda $N \times T$ adet 0-1 değişkeni ve $(N+2)T+N(d-1)$ adet doğrusal kısıt bulunmaktadır. Burada d koni içerisinde kalan elementlerin ortalama sayısıdır. Genellikle T 10 civarında; N ise küçük sayılabilecek ocaklarda 100.000 daha büyük ocaklarda ise 1.000.000 civarındadır. Sonuç olarak madencilikte karışık tamsayı programlama ile formüle edilmiş bir problem, ticari paketlerin doğrudan çözebilmesi için çok büyüktür. Bu büyüklükteki madencilik problemlerini çözebilecek bir yöntemin olmamasından dolayı bu problemleri daha basit alt-problemler haline getirme zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Örneğin; öncelikle ocak nihai sınırlarının bulunup bu sınırlar içerisinde üretim sıralaması yapılması, hesaba katılması gereken blok sayısını düşüreceğinden değişken sayısı ve doğrudan işlem zamanında da azalma sağlayacaktır (Caccetta ve Hill, 2003).

Bu modelin doğrusal programlama modeline göre iki avantajı bulunmaktadır. Birinci avantajı, pratik olarak daha uygulanabilir bir kazı sıralaması vermesidir. İkinci avantajı ise bir blok kazılmadan önce üzerindeki bütün mevcut kısıtlayıcı blok parçalarının tamamen kazılmış olması gerektiğidir. Bu modelin dezavantajı ise büyük çaptaki problemlerde ticari yazılımların yetersiz kalması ve kullanılamamasıdır. Bunun sebebi modelin çok fazla sayıda ikili değer (binary (0,1)) değişkeni içermesidir. Buna ek olarak, model boyutunun artmasından dolayı dinamik sınır tenörü kavramının hesaba katılamamasıdır (Osanloo ve diğ., 2008).

2.3.1.3 Tamsayı programlama

Açık ocak üretim planlamasında kullanılan tamsayı programlama modeli için amaç fonksiyonu ve kısıtlar genel olarak aşağıdaki gibidir (Khan ve Niemann-Delius, 2014).

Amaç fonksiyonu;

$$Max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T v_{it} x_{it} \quad (2.28)$$

Burada;

$v_{it} = \left(\frac{v_i}{(1+d)^t} \right)$ i bloğunun t periyodunda iskonto edilmiş ekonomik değeridir. Burada d iskonto oranını belirtir.

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & i \text{ bloğu } t \text{ döneminde alınırsa} \\ 0, & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

N: toplam blok sayısı

T: toplam periyot sayısı

t: zaman periyodu indeksi, t= 1, 2, ..., T

i: blok indeksi, i= 1, 2, ..., N

Rezerv Kısıtları;

$$\sum_{t=1}^T x_{it} \leq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2.29)$$

Şev Kısıtları;

$$x_{it} - \sum_{\tau=1}^t x_{j\tau} \leq 0 \quad (2.30)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.31)$$

Burada j ∈ (i bloğundan önce alınması gereken bloklar) olarak tanımlanmıştır. Şev kısıtlarının verilmesinin sebebi, her bloğun kendinden önceki bloklar çıkarıldıktan sonra çıkarılması gerektiğidir.

Üretim Kısıtları;

$$\sum_{i=1}^N w_i * x_{it} \geq \overline{M}^t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (2.32)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i * x_{it} \leq \underline{M}^t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (2.33)$$

Burada verilen üretim kısıtları, t periyodunda kazılması gereken malzemenin alt ($\underline{M}^t$) ve üst ($\overline{M}^t$) sınırlarını göstermektedir. w_i ise blok tonajını belirtir.

Cevher Hazırlama Kapasitesi Kısıtları;

$$\sum_{i=1}^N o_i * w_i * x_{it} \geq \underline{O}^t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (2.34)$$

$$\sum_{i=1}^N o_i * w_i * x_{it} \geq \overline{O}^t, \quad \forall t = 1, 2, \dots, T \quad (2.35)$$

Burada verilen cevher hazırlama kapasitesi kısıtları, t periyodunda işlenebilecek toplam cevher miktarının alt ($\underline{O}^t$) ve üst ($\overline{O}^t$) sınırlarını göstermektedir. Formülasyonlarda o_i ile gösterilen sabit katsayı; kazılan blok cevher bloğu ise 1'e, dekapaj bloğu ise 0'a eşittir.

İkili değerlerden (binary (0,1)) oluşan tamsayı programlama formülasyonu genellikle çok sayıda sıfır-bir değişkeni içerir. Bu nedenle günümüzdeki ticari yazılımların kapasitesi böyle bir problemi çözme konusunda yetersiz kalabilmektedir. Bu tarz bir problemin çözülebilmesi için araştırmacılar çok sayıda araştırma yapmış ve farklı modeller geliştirmişlerdir (Osanloo ve diğ., 2008).

2.3.1.4 Dinamik programlama

Dinamik programlama, genel kullanımda karışık olarak nitelendirilen ana problemin daha küçük alt-problemlere bölünerek her bir alt-problem için optimum sonuçlar elde edilmesi yönündeki teorisiyle ilk olarak Bellman (1957) tarafından önerilmiştir. Bu teorinin ana fikri bütün olasılıkları hesaplamak ve uygun olanı seçmektir. Diğer optimizasyon tekniklerine göre bu yöntemin standart bir formülasyonu yoktur.

Bir problem üzerinde dinamik programlama tekniklerini uygulayabilmek için o problemin alt-problemlere parçalanabilir veya bir önceki problemin karakteristiğini koruyacak şekilde çözümü daha kolay başka probleme dönüştürülebilir olması yeterlidir.

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması problemi de alt-problemlere bölünebilme özelliğinden dolayı dinamik programlama yöntemleriyle çözülmesi için birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla, dinamik programlama kullanan yöntemler bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

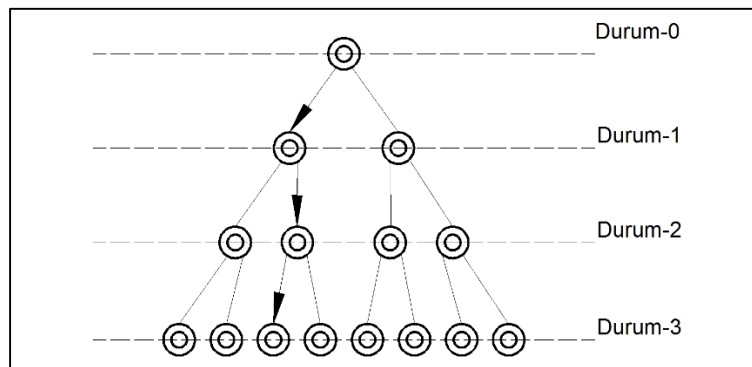
2.3.2 Açık işletmelerde üretim planlamasına yönelik çözüm yöntemleri

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması amacıyla birçok matematiksel model geliştirilmesine rağmen bu modellerin uygulanması konusunda çok fazla değişken içermesinden dolayı oluşan bazı problemler bulunmaktadır. Bu nedenle günümüze kadar üretim planlaması problemini çözmeye yönelik birçok algoritma ve yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlardan en önemli olanları bu bölümde incelenecektir.

2.3.2.1 Dinamik programlama ile çözüm

a) Roman yaklaşımı

Dinamik programlama, açık ocak işletmelerinde üretim planlaması amacıyla ilk defa Roman (1974) tarafından kullanılmıştır. Ocak nihai sınırlarının bulunması ve blok kazı sıralaması aynı anda yapılabilir. Bu algorithmada kazılacak son bloğun konumu başlangıçta belirlenmelidir. Kazı sıralamasının başlangıç noktası bu bloktur. Algorithmadaki karar değişkeni yeni bloğun kazılması için kararlar sunar. Şev açılarına göre, seçilmiş olan bloğun üzerindeki bütün olası bloklar kontrol edilir. Optimum kazı sıralaması NBD hesaplama sonucunda belirlenir. En yüksek NBD veren sıralama seçilir ve bu değer başlangıçtaki ocak şekline eklenir. Pozitif NBD'yi desteklemeyen bloklar nihai sınırlar dışarısında kalır ve üretim planına dâhil edilmez. Bu prosedür bütün bloklar inceleninceye kadar devam eder. Yöntemin ilerleme şekli grafiksel olarak Osanloo ve diğ. (2008) tarafından aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Dinamik programlama yöntemi grafiksel gösterimi.

Bu yöntemin avantajı paranın zaman değerini ve blok kazı sıralamasını hesaba katarak ocak nihai sınırlarını bulmasıdır. Yöntemin dezavantajları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir (Osanloo ve diğ., 2008);

- Yöntemin karmaşık yapısından dolayı büyük boyuttaki ocaklara uygulanmasının zorluğu
- Algoritmanın ocak tabanından yukarıya doğru ilerlemesinden dolayı, kazı ve cevher hazırlama tesisi kapasitesi kısıtlarının karşılanmasının garanti edilememesi
- Ocak hacminin birim maliyete etkisinin hesap edilmemesi

b) Dowd ve Onur yaklaşımı

Dowd ve Onur (1992) ve Onur ve Dowd (1993) üretim planlaması problemini dinamik programlama olarak formüle etmişler ve alternatiflerin çok fazla olmasından dolayı bilgisayar kapasitelerinin büyük problemlerin çözümü için yeterli olamayacağını belirtmişlerdir. Ancak üretim planlamasında farklı tipteki kısıtlardan dolayı aşırı derecede artan alternatif sayısının azaltılacağı belirtilmiştir. Bu, çekici olmayan alternatiflerin ortadan kaldırılması olarak düşünülebilir. Algoritmanın başlangıcında kazı işlemlerinin periyotlara bölünmesi dinamik programlamada safhaları (stages) oluşturur. Bu algorithmada, cevher modelinde kalan bloklar kümesi safha olarak isimlendirilir. Verilen zaman periyodu için sıralama bulunmaya çalışılır.

c) Erarslan ve Çelebi yaklaşımı

Erarslan (1996) ve Erarslan ve Celebi (2001) üretim planının bir fonksiyonu olarak ocak nihai sınırlarını belirleyen simülatif bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Sistemde blok kazı sırasının optimizasyonu için dinamik programlama tekniği kullanılmıştır. Yöntem sayesinde blokların ekonomik değerleri ocak hacmine bağlı olarak ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Simülasyon özelliği ile saha kazısı, kazıcı hareketleri, şev duraylılığı, cevher hazırlama tesis kapasitesi ve paranın zaman değeri gibi değişkenler dikkate alınabilmektedir. Ocağın optimum saha sınırları, en yüksek şimdiki zaman değerinin elde edildiği ocak hacmi ve şekli olarak belirlenebilmektedir.

Algoritma, öncelikle bütün cevherin kazılabileceği bir ocak sınırı belirler. Bu sınır ocağın alabileceği en geniş sınır olarak kabul edilebilir. Ardından birim maliyeti hesabı yapılır. Cevher satış fiyatı da hesaba katılarak blokların ekonomik değerleri hesaplanır. Sisteme kazı başlangıç noktası girildikten sonra bu noktadan itibaren blok kazı

sıralaması 3D koordinat sisteminde simüle edilir. Kazı aktiviteleri, harmanlama, stok sahası ve cevher hazırlama tesisi gibi operasyonel kısıtlar da simüle edilir. Test edilen bloğun etrafındaki komşu blokların kazılıp kazılamayacağı belirlenir. Kazılabilir nitelikteki bloklar şev açısına uygunluk testinden geçirilir. Testi geçen bloklara dallar ile bağlanılır. Dinamik programlama tekniği gereği bu dallardaki her bir blok için de sonraki aşamalarda benzer dal yapıları oluşturulacaktır. Net bugünkü zaman değerleri bu aşamada belirlenir. Dinamik programlamada karşılaşılan en büyük problem, birbirini takip eden dal sayısının kısa bir sürede katlanarak 10^{100} mertebesinde rakamlara ulaşabilmesidir. Bu nedenle dinamik dal oluşumuna sınırlama getirmek gereklidir. Yöntemin ayrıntılı anlatımı Erarslan (1996) ve Erarslan ve Celebi (2001) tarafından sunulmuştur. Yöntemin akış şeması ise şekilde (Şekil 2.12) gösterilmiştir (Erarslan ve diğ., 1999). Net bugünkü zaman değerinin maksimizasyonunu amaçlayan model, dinamik programlama yöntemiyle tasarlanmış bir üretim planı algoritmasına sahiptir. Algoritmanın amacı aşağıdaki eşitlikte (2.36) verilmiştir (Erarslan ve Celebi, 2001);

$$PW(\psi) = \max_{\psi \in S_v} \left(NPV(\psi, \xi_{ijk}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c) \right) \quad (2.36)$$

$PW(\psi)$ = ψ hacmindeki maksimum net bugünkü değer, (TL)

S_v = hacim seti, (m^3)

ξ_{ijk} = (i, j, k) blok indisli kazı başlangıç noktası

g_c = sınır tenörü, (%)

g_p = tesisin istediği tenör, (%)

α = şev açısı, ($^\circ$)

d_r = iskonto oranı, (%)

a^o = yıllık üretim miktarı, (m^3)

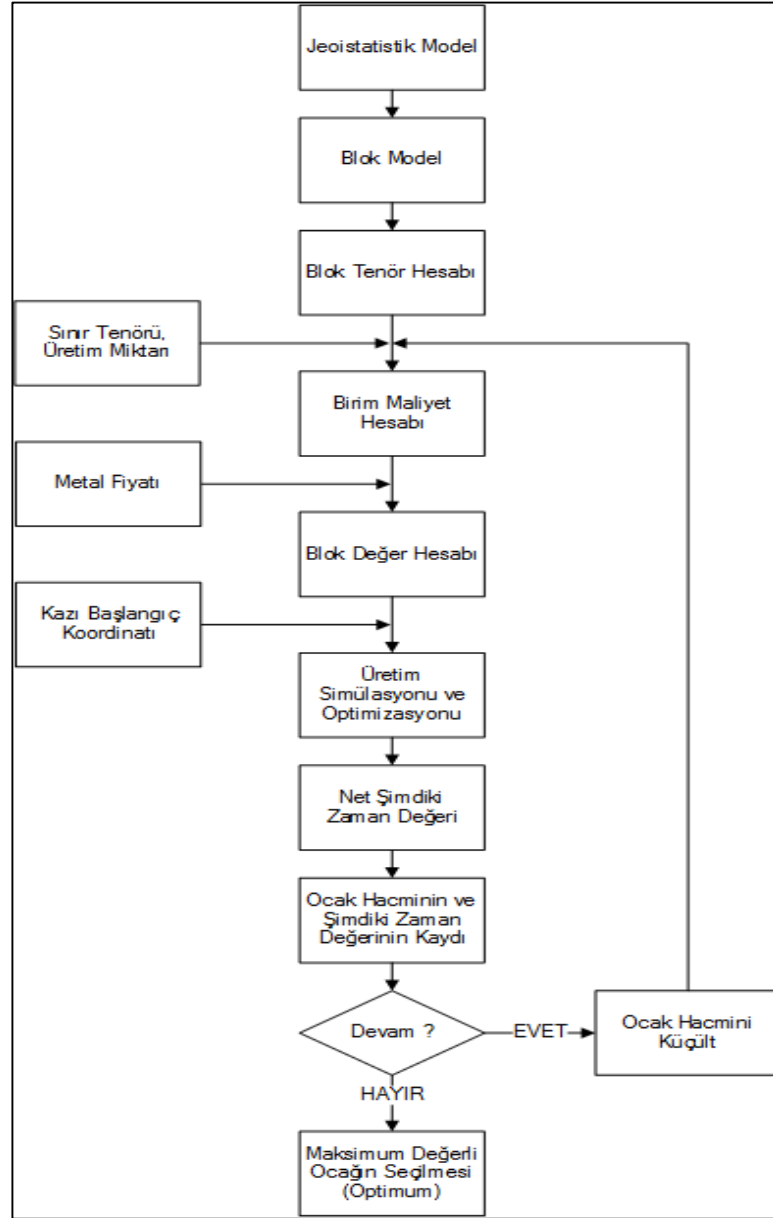
a^e = yıllık toplam kazı (üretim + dekapaj), (m^3)

s_c = silo şartları fonksiyonu, ($s_c = f(r_s, msg_{ijk})$)

r_s = silodaki riskli miktarlar

msg_{ijk} = (i, j, k) bloğunun çıkış zamanı ile ilgili stok durumuna ait mesaj

Burada $NPV(\psi, \xi_{ijk}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)$, ψ hacmi için net şimdiki zaman değeridir ve pek çok parametre tarafından kontrol edilir. Net bugünkü değer, dinamik programlama yöntemiyle çıkarılan bloklar tarafından belirlenmektedir.



Şekil 2.12 : Simülatif optimizasyon sisteminin şeması.

Yöntemin avantajları (Osanloo ve diğ., 2008) tarafından şu şekilde sıralanmıştır;

- Ocak nihai sınırlarının ve üretim sıralamasının eş zamanlı yapılabilmesi
- Her bir iterasyonda birim maliyetin tahmin edilebilme özelliği açısından diğer üretim planlaması yapan algoritmalarından farklı olması. Bu sebeple ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasının optimuma daha yakın olması.

- Nakliye, stok sahası, cevher harmanlama ve zenginleştirme tesisi gibi operasyonel kısıtların hesaba katılabilmesi

2.3.2.2 Parametrik analiz (parameterization)

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlamasında en sık kullanılan yöntemler parametrik değerler ile yapılan çalışmalardır. Genel olarak parametreleştirme yöntemi olarak isimlendirilir. Parametrik değerler, gerçek verilerden elde edilmiş olan ve isteğe göre ağırlıklandırılarak elde edilen değerlerdir.

Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından önerilen nihai sınır tespiti belirlenmesine yönelik yaklaşımdan sonra parametreleştirme (Parameterization) yönteminin yolu Matheron (1975) tarafından açılmış ve kazı sıralaması konusunda parametrik analiz konsepti geliştirilmiştir.

Optimum pit sınırlarını veren yöntemler, bloklardan elde edilen gelir ve gider arasındaki farkın hesaplanarak ortaya çıkan kazanç miktarlarının bloklara atanması ve oluşan blok model üzerinde maksimum kazancı sağlayan ocak sınırlarının bulunması mantığıyla çalışmaktadır. Bu durumda tenör, maliyet, satış fiyatı ve cevher kazanım faktörü gibi değişkenlerin sabit olduğu kabul edilir. Bu değişkenlerin tahmin yoluyla elde edilmesinden dolayı bu mantıkla çalışan yöntemlerin hata yapma olasılığı artmaktadır. Gerçek hayatta bu değişkenler zaman geçtikçe değişebilmektedir. Tenör ve satış fiyatlarındaki çok küçük değişiklikler dahi ocağın üretim planlamasında büyük değişikliklere yol açmaktadır.

Parametreleştirme yönteminde açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralaması için bloklara atanmış değişkenlerin sabit olarak hesaba katılmayıp sistematik olarak değiştirilmesiyle çalışmalar yapılır. Örneğin; sistematik olarak yükseltilecek kazı maliyeti ya da düşürülen cevher satış fiyatıyla nihai sınır tespiti yapılır. Eğer aynı anda iki farklı parametrede değişiklik yapılıyorsa buna ikili parametreleştirme (double parameterization) denilir. Bütün bu çalışmalardan elde edilecek sonuç; küçükten büyüğe sıralanmış olan iç içe ocaklar serisidir. İç içe ocaklar serisi ise üretim sıralaması ve açık ocak sınırlarının tespitinde kullanılmaktadır.

Parametreleştirme yöntemindeki amaç; blok değerini belirleyen değişkenlerin (satış fiyatı, kazı maliyeti, zenginleştirme maliyetleri) zamana bağlı değişimlerinde ortaya çıkacak olan durumların üretim planlamasına yansıtılmaya çalışılması ve elde edilen sonuçlara göre kazı planlamasının yapılmasıdır. Ocak boyutlarındaki bu değişimler ise

duyarlılık analizi olarak görülebilir ve Crawford (1979) tarafından “ocak sınır analizi” (pit limit analysis) şeklinde tanımlanmıştır.

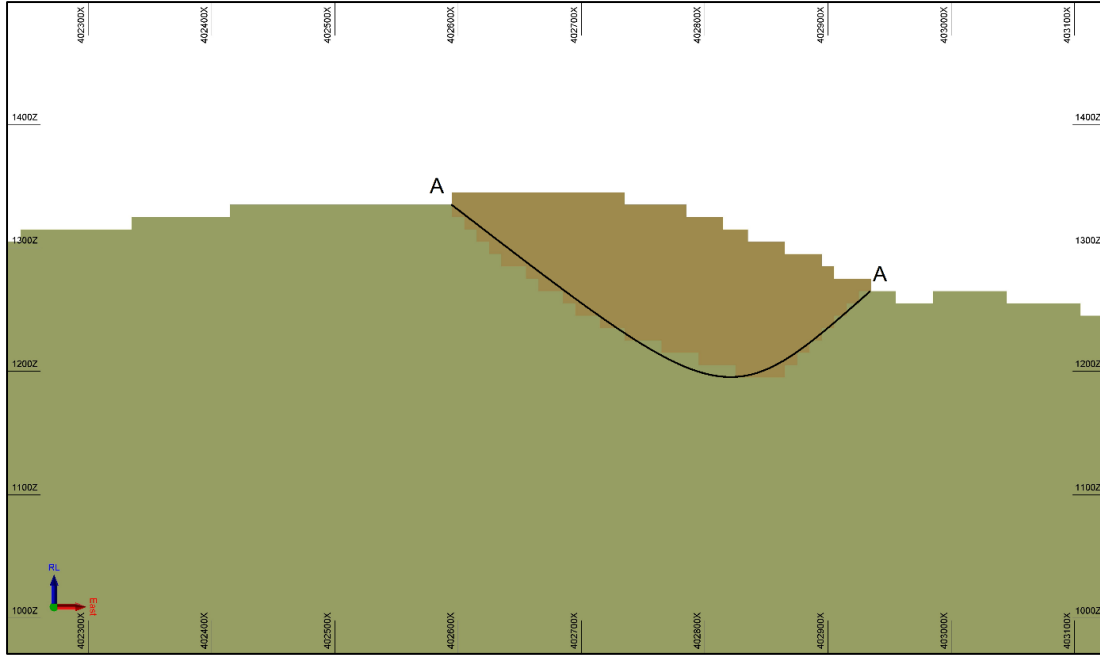
Parametreleştirme yöntemi kullanılarak Francois-Bongarcon ve Marechal (1976) tarafından MULTIPIT yazılımı geliştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Bu çalışmalardan sonra Francois-Bongarcon ve Guibal (1984), Caccetta ve Giannini (1988), Caccetta ve diğ. (1998), Coléou (1988), Dagdelen ve Johnson (1986), Whittle (1993) ve Whittle (1998) gibi birçok araştırmacı bu yöntemin uygulanması ve geliştirilmesi için çalışmalar yapmışlardır.

Parametreleştirme yönteminde ekonomik değerlerle çalışılabileceği gibi, blokların tenör değerlerinin değişimi ile de iç içe ocaklar serisi elde edilebilir. Yöntemden elde edilen ocaklar; blokların ekonomik değerleri kullanıldıysa maksimum ekonomik kazancı, blokların tenörü kullanıldıysa maksimum metal içeriğini veren ocaklardır.

a) Whittle yaklaşımı

Whittle (1993) üretim planlamasını optimize etmek amacıyla iç içe ocaklar serisini elde ederken blokların ekonomik değerlerini kullanır. Elde edilen blok ekonomik değerleri ile optimum nihai sınırlar bulunabilir. Örnek olarak şekildeki kesitte bir açık ocağın nihai sınırları verilmiştir (Şekil 2.13). Bu “A” sınırları içerisinde kalan her bir blok “kazılmaya değer” olarak düşünülebilir. Her blok kendi içinde cevher ve/veya pasa içerebilir. Cevher içeren blokların tenör değerleri de birbirinden farklı olabilir. Bloklar içerdiği bu cevher ve pasa miktarına göre ekonomik değere sahip olurlar. Nakit akışı, bu blokların kazılmasıyla elde edilen toplam ekonomik değerdir ve bu değer cevherin satış fiyatı ve maliyetler ile belirlenir. Maliyetlerin sabit tutulup cevher satış fiyatının arttırılması durumunda nakit akışı hiçbir zaman düşmez ve yükselir. Böylece “A” nihai sınırları içerisinde kalan her bloğun değeri artar ve hala kazılmaya değer olarak görülür.

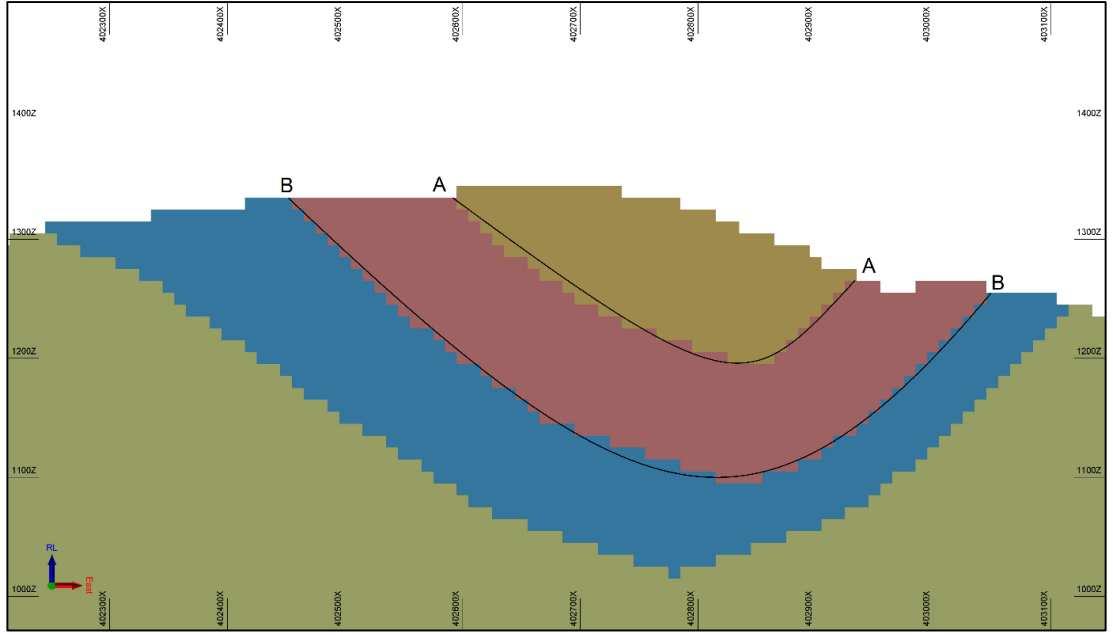
Eğer yeni elde edilen değerler ile “B” nihai sınırları bulunursa (Şekil 2.14) bu sınırların “A” nihai sınırlarını da kapsayacağı kesindir. Hatta “A” nihai sınırları içerisinde yer alan bloklara ek olarak, daha önceden kazılmaya değer görülmeyen yeni bloklar da artık kazılmaya değer görülebilir.



Şekil 2.13 : Whittle yöntemi ile belirlenmiş nihai ocak sınırı.

Cevher satış fiyatının arttırılmasıyla yeni nihai sınırların elde edilmesi ile oluşan bu işlem adım adım tekrarlanırsa iç içe ocaklar serisi (Nested Pits Series ya da Pit Shells) elde edilir. Gelir kaleminin adım adım arttırılması işlemi, önceden belirlenen aralıkta ve belli adımlarla yapılır (örneğin 0,2 ile 2,0 arasında 0,1 artışla) ve bu katsayıya Gelir Ayarlama Faktörü (Revenue Adjustment Factor (RAF)) denilir. Burada gelirin küçük katsayılarla başlatılmasının nedeni elde edilen ve küçükten büyüğe sıralanan iç içe ocaklar serisi sayesinde kazı başlangıç yerinin ve daha sonraki kazı sıralamasının belirlenmesidir.

Elde edilen nihai sınırların birbirine uzaklığı genellikle çok fazla değildir. Ancak ani tenör değişikliklerinde ya da cevher süreksizliklerinde iki nihai sınır arasında büyük kazı farklılıkları diğer bir deyişle aralık problemi oluşabilir (gap problem). Elde edilen nihai sınırların tamamı ocak şev gereksinimlerini karşıladığından dolayı kazı sıralaması sırasında herhangi bir sınır kullanılabilir.



Şekil 2.14 : Whittle yöntemi ile oluşturulan iç içe ocaklar serisi.

Whittle (1988) tarafından parametreleştirme konsepti üzerine oluşturulmuş olan Four-D (Whittle, 1993) ve Four-X (Whittle, 1998) yazılımları yaygın olarak kullanılan yazılımlardır. Whittle, blokların ekonomik değerlerine etki eden değişken sayısını ikiye düşürerek bir majör ve bir minör değişkenden faydalanmak istemiştir. Kullanılan değişkenlerden majör olanı bir ton kazı için satılması gereken ürün miktarıdır (mcostm). Minör değişken ise cevher hazırlama maliyeti/kazı maliyeti (cratio) olarak verilmiştir (Ramazan ve Dagdelen, 1998). Birim tonaja sahip olan bir bloğun ekonomik değeri (Whittle, 1993) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir (Eşitlik (2.37)(2.38)).

$$V = G * R * P - C_p - C_m \quad (2.37)$$

Dekapaj bloğu için ise;

$$V = -C_m \quad (2.38)$$

Burada;

V : blok değeri, (TL/ton)

G : tenör, (%)

R : kazanım yüzdesi, (%)

P : cevher satış fiyatı, (TL/ton)

C_m : kazı maliyeti, (TL/ton)

C_p : cevher zenginleştirme maliyeti, (TL/ton)

Eşitlik (2.37), C_m ile bölünürse yukarıda bahsedilen iki değişken elde edilir. Böylece yeni değişkenleri içeren formül aşağıdaki gibidir.

$$\frac{V}{C_m} = G * R * \left(\frac{P}{C_m} \right) - \left(\frac{C_p}{C_m} \right) - 1 \quad (2.39)$$

Aslında bu formülasyonda etkili olan değişken $\frac{P}{C_m}$ 'dir. Çünkü $\frac{C_p}{C_m}$ 'nin ocak ömrü boyunca aşırı derecede değişimi beklenmemektedir. Bu nedenle Eşitlik (2.39) yerine Eşitlik (2.40) yazılabilir.

$$V^I = G * R * -\lambda - \theta \quad (2.40)$$

Burada;

V^I : kazı birim maliyeti başına düşen ekonomik değer

λ : bir ton kazı için satılması gereken ürün miktarı (mcostm), (ton)

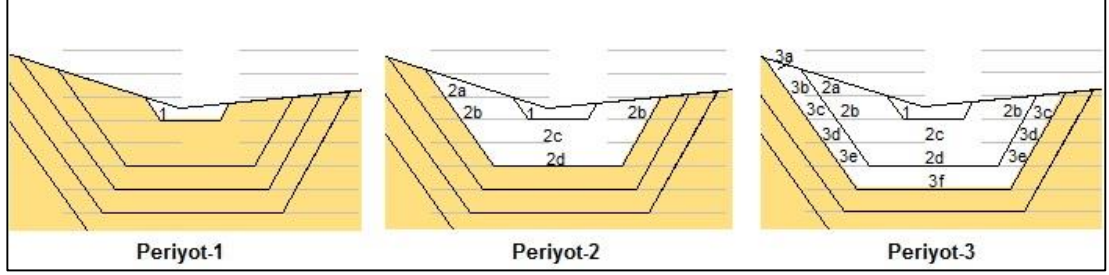
θ : cevher hazırlama maliyeti/kazı maliyeti (cratio)

λ ve θ değişkenlerinin sıfırdan başlayarak artan değerleriyle iç içe ocaklar serisi edildikten sonra kazı sıralaması belli olduğundan dolayı iskontolu değerler hesaplanabilir ve maksimum NBD'yi veren ocak sınırları nihai sınır kabul edilir. Daha sonra birkaç farklı üretim oranı, belirlenen ocak sınırı içerisinde sırayla test edilir. En yüksek NBD'yi veren üretim miktarı böylece seçilmiş olur.

Whittle (1993) parametreleştirme yöntemi sayesinde elde edilen iç içe ocaklar serisinde yer alan ocakların kazı sıralaması konusunda değişik senaryolar üretmeye çalışmıştır. Bu senaryolar literatürde “en iyi durum” (the best case), “en kötü durum” (the worst case) ve “sabit ilerleme” (constant lag (Milawa Algoritması)) senaryoları olarak geçmektedir. Bu senaryolar hakkında aşağıda yer alan bilgiler Geovia Whittle™ programının yardım dosyalarından hazırlanmıştır.

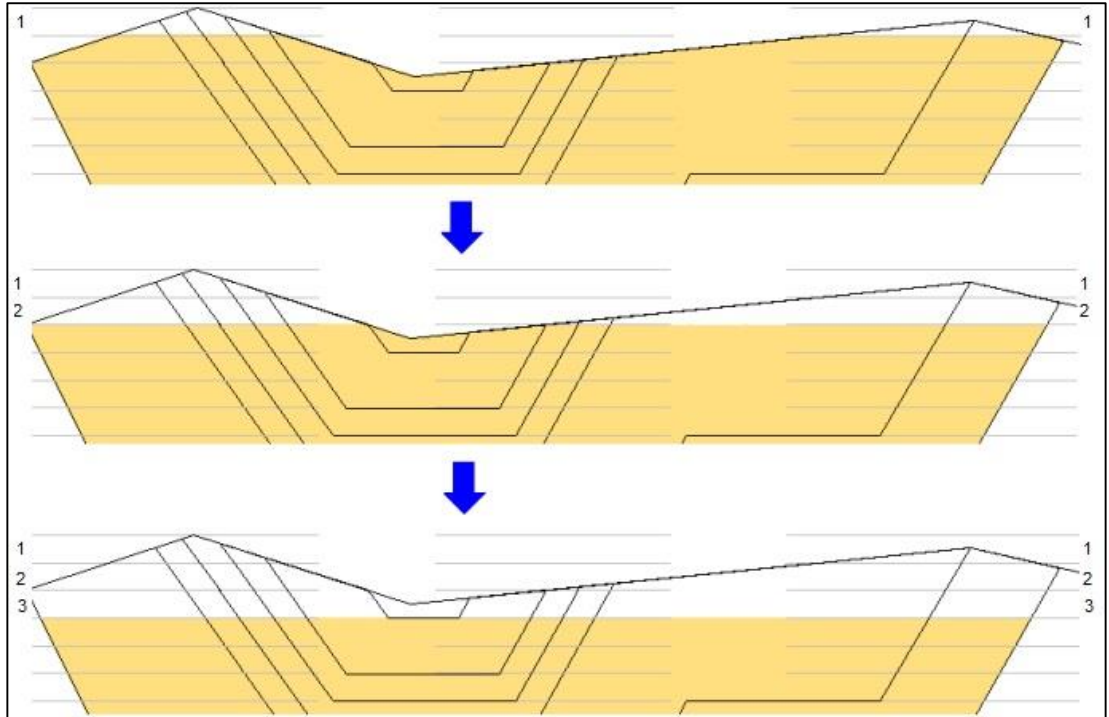
En iyi durum senaryosunda iç içe ocaklar serisinde yer alan her bir ocak sırasıyla en küçükten en büyük olanına doğru kazılır. Her bir ocağın üretimi ise kendi içerisinde en üst basamaktan en alt basamağa doğru yapılır. Bir ocak tamamıyla bitirildiğinde

diğer ocağın üretimine geçilir. Böylelikle her bir ocak kendi içerisinde kademeli olarak ilerletilir. Böyle bir üretim sıralaması pratikte uygulanamayabilir. Bunun nedeni ocaklar arasındaki mesafenin bazen çok dar olabilmesidir. Bu üretim sıralaması ile ocaktan elde edilen net bugünkü değer maksimum olarak kabul edilir. Şekilde her bir ocak periyodundaki kazı ilerlemesi görülmektedir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 : En İyi Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.

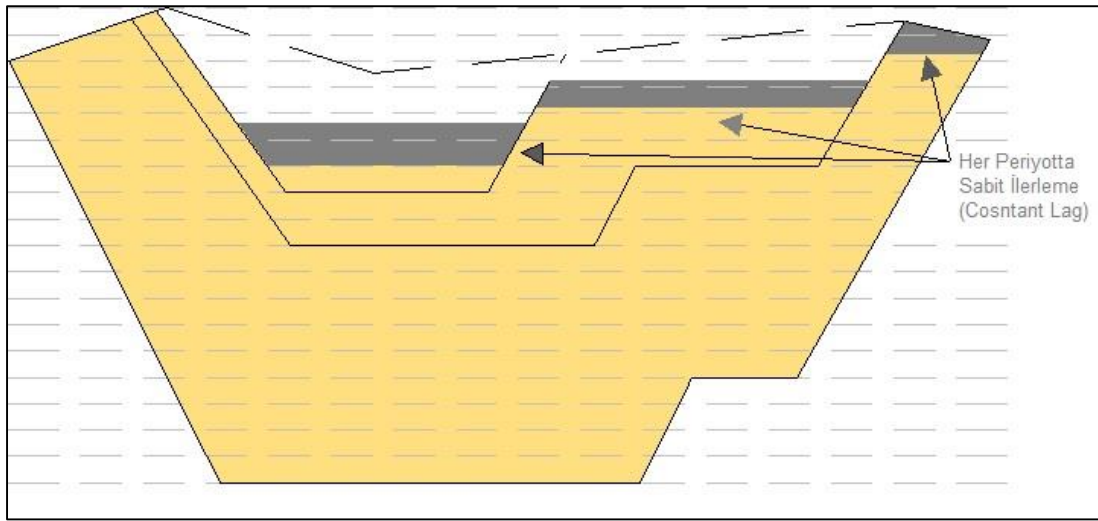
En kötü durum senaryosunda ise içe içe ocaklar serisinde yer alan her bir basamak tamamen kazıldıktan sonra bir sonraki basamağın üretimine geçilir. Bu tarz bir üretim sıralaması genellikle pratikte uygulanabilir. Bu üretim sıralamasında ocaktan elde edilen gelirin net bugünkü değeri minimum sınır olarak kabul edilir. Aşağıdaki şekilde kazı ilerlemesi görülmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : En Kötü Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.

Genellikle en iyi durum senaryosu ve en kötü durum senaryosu arasındaki net bugünkü değer farkı çok büyüktür. Bu iki uç nokta arasında daha gerçekçi ve uygulanabilir bir

Üretim sıralamasının yapılması mümkündür. Bu retim sıralamasında dönemlik üretim planı sınırları içerisinde kalan ve en iyi durum senaryosundaki net bugünkü değere mümkün olduğunca en yakın sonucun elde edilmesi ideal olarak kabul edilir. Bu senaryoya sabit ilerleme durum senaryosu (Milawa Algoritması) olarak isimlendirilir. Ağağıdaki şekilde bu tanıma uyan üretim sıralaması verilmiştir (şekil 2.17). Bu retim sıralamasında hangi ocak ve hangi basamakta kazı yapılması gerektiği Milawa algoritması tarafından belirlenmektedir. Milawa algoritması uzun vadeli üretim planlaması için geliştirilmiş olan bir algoritmadır. Bu algoritmada bir fazda üretim yapılabilecek maksimum basamak sayısı kısıtı girilebilmektedir.



şekil 2.17 : Sabit İlerleme Durum senaryosunda kazı ilerlemesi.

Whittle yaklaşımının avantajları Caccetta ve Hill (2003) tarafından ağağıdaki gibi verilmiştir;

- İ i ocaklar serisinin elde edilmesinin kolaylığı (sadece parametreleri değiştirerek nihai sınırların belirlenmesi)
- Cevher modeli içerisinde yüksek tenörlü kümelerin belirlenmesi
- Fiyat değişiklikleri ile belirlenen nihai ocak sınırlarının duyarlılık analizi konusunda da yardımcı olması

Whittle yaklaşımının dezavantajları ise Caccetta ve Hill (2003) tarafından ağağıdaki gibi verilmiştir;

- Zaman ve üretim miktarı gibi değişkenlerin parametreler ile dolaylı olarak optimizasyon modeline entegre edilebilmesi

- İç içe ocakların birinden diğerine geçerken üretim miktarındaki değişimlerin düzensiz olabilmesi
- Optimum olup olmamasının garanti edilememesi (Aslında “en iyi durum” senaryosu maksimum NBD’yi veremeyebilir)
- Maliyet girdilerinin sabit olduğu varsayımı (Whittle (1993), maliyet değişiminin 5 yıl içerisinde %20 oranında değişebileceğini belirtmiştir)
- Maksimum kazı derinliği ve minimum kazı genişliği gibi fiziksel bazı kısıtlamaların formülasyona yerleştirilememesi
- Kazı sıralamasının üretim gereksinimlerini karşılayamama problemi

Parametreleştirme yaklaşımını kullanarak üretim planlaması yapan diğer bir yazılım da Earthworks NPV Scheduler programıdır (Earthworks, 2014). Bu program öncelikle iç içe ocaklar serisini oluşturur. Daha sonra bu iç içe ocakları kullanarak sezgisel olarak fazlar (phase, pushback) tanımlanır. Faz oluşturmak için, iç içe ocaklar serisinden mümkün olduğunca birbirine yakın sıralamaları seçerek ekipman ulaşımını kolaylaştırır. Son olarak da faz sıralamasını NBD’yi maksimize etmek amacıyla yeniden sıralar. Bu programın en büyük avantajı mekânsal sıkıntıları daha aza indirgeyen kazı sıralamasını vermesidir. Ancak yukarıda bahsedilen iç içe ocaklar serisi yaklaşımını kullanan diğer programlarda olduğu gibi optimum sonuçtan önemli derecede uzaklaşmakta ve uygun çözüm garanti edilememektedir (Caccetta ve Hill, 2003).

b) Rezerv parametreleştirme

Rezerv parametreleştirme yönteminde üç farklı parametre kullanılmaktadır (Francois-Bongarcon ve Guibal, 1982);

- Toplam kazılan malzeme (cevher + pasa) (V)
- Toplam kazılan cevher (tesise beslenecek tüvenan cevher) (T)
- Toplam metal içeriği (Q)

Rezerv parametreleştirme yönteminde amaç; V ve T değişkenleri için maksimum Q değerini ($Q_{\max}$) veren ocak serisini bulmaktır. Bu seri “teknik olarak optimum ocak” olarak ifade edilir. Her bir (V,T) çifti için $Q_{\max}$ değerinin araştırılması çok karmaşık ve muhtemelen çözülemeyen kombinatorik bir probleme yol açar. Bu nedenle

problem, benzer bir eşitlik olan konveks analiz problemine dönüştürülür. Bir (V,T) için maksimize edilmesi gereken formül aşağıdaki gibidir (Wang, 1992) ;

$$Q_{max} = \sum_{B_i \subset E} (Q_i - hT_i - kV_i) \quad (2.41)$$

Burada;

B_i : i nolu blok,

E : B_i bloklarından oluşan küme,

Q_i : B_i bloğunun metal içeriği

T_i : B_i bloğunun tonajı

V_i : B_i bloğunun toplam tonajı

h ve k : Lagranj çarpanları

Matematiksel ifadelerden dolayı anlaşılması zor olan rezerv parametreleştirme yöntemi Francois-Bongarcon ve Marechal (1976), Dagdelen ve Francois-Bongarcon (1982) ve Dagdelen ve Johnson (1986) tarafından daha anlaşılır bir şekilde açıklanmıştır.

c) Lagranj gevşetme yaklaşımı (Lagrange relaxation approach)

Bu algoritma; teorik olarak matematik biliminin Lagrange konseptine, pratikte ise parametreleştirme konseptine dayalıdır. Bu yaklaşımda doğrusal programlama formülasyonu üzerinde Lagranj Çarpanları (Lagrange Multipliers) kullanılarak, karmaşık bir yapıya sahip olan çok-dönemli (multi-period) problem küçük parçalara ayrıştırılır ve tek-dönemli (single-period) problemler haline getirilir. Bu tek-dönemli problemler ise optimum nihai sınır algoritmaları ile çözülebilmektedir. Bu yöntemin uygulanması için tesis tenör ihtiyacı, kazı kapasitesi ve cevher hazırlama tesisine beslenen miktar gibi kısıtlamaların Lagranj Çarpanları ile çarpılıp amaç fonksiyonundan çıkarılması yeterlidir. Bu şekilde kısıtlar gevşetilmiş olur. Böylece amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir (Held ve diğ. (1974), Sandi (1979)):

$$\begin{aligned} MaxZ = & C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_TX_T - \Lambda_1(A_1X_1 - b_1) \\ & - \Lambda_2(A_2X_2 - b_2) - \dots - \Lambda_T(A_TX_T - b_T) \end{aligned} \quad (2.42)$$

Burada; $\Lambda = (\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_T)$ ve $\Lambda_t = (\lambda_{1t}, \lambda_{2t}, \dots, \lambda_{kt})$ Lagranj Çarpanları olarak adlandırılır.

Amaç fonksiyonu $C_t - A_t$ yerine D_t yerleştirilerek daha da basitleştirilebilir ayrıca A_t, b_t aşağıdaki gibi ihmal edilebilir:

$$MaxZ = D_1X_1 + D_2X_2 + \dots + D_TX_T \quad (2.43)$$

Kısıtlar ise sıralama ve rezerv kısıtlarıdır. Daha sonra, optimum sıralama elde edilene kadar alt-gradyan (sub-gradient) yöntemiyle Lagranj çarpanları ayarlanır. Her adımda açık ocak nihai sınırları problemine benzeyen bir problem çözülmelidir. Mevcut kısıtlamalar için uygun bir çözüm sunabilecek hiçbir çarpanın olmadığı durumlarda, bu metot optimum bir çözüm sunamayabilir. Bu gibi durumlara aralık problemi (Gap Problem) denilir.

Caccetta ve diğ. (1998), bu yöntemi 20979 bloğa sahip gerçek bir cevher üzerinde 6 döneme ayırarak test etmişlerdir. Bu çalışmada teorik olarak %5 daha optimum kazı sıralaması elde edilmiştir. Bu algoritmanın bir dezavantajı, kazı sıralaması yaparken dinamik sınır tenörü kavramının hesaba katılmamasıdır. Akaike ve Dagdelen (1999) daha sonra 4-Boyutlu Gevşetme Yaklaşımını önermişlerdir. Bu yöntemde dinamik sınır tenörü kavramı da hesaba katılmıştır.

2.3.2.3 Konumsal ağırlık yaklaşımı (positional weight)

Bu bölümde çıkış noktası sezgisel yöntemler arasında yer alan Konumsal Ağırlık yaklaşımı temeline dayanan yöntemler incelenmiştir. Konumsal ağırlık yaklaşımı ilk olarak endüstriyel üretim hatlarında iş yüküne göre sıralamayı sağlamak amacıyla Helgeson ve Birnie (1961) tarafından kullanılmıştır.

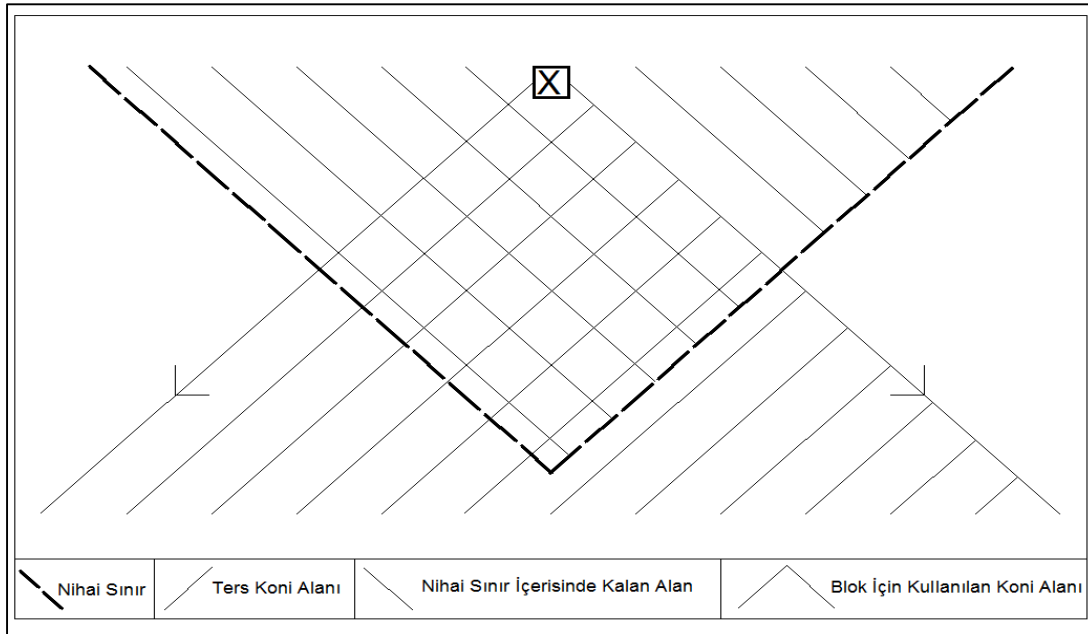
a) Gershon yaklaşımı

Gershon (1987) matematiksel optimizasyon yöntemlerinin karmaşıklığı ve pratik olmayışı, aynı zamanda geleneksel yaklaşımların optimum sonuca olan uzaklığından dolayı açık ocaklarda üretim planlamasında önemli bir rol oynayacak olan sezgisel bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım ile araştırmacılara daha anlaşılır, pratik, kullanışlı ve uygulanması kolay bir çözüm yöntemi sunmaya çalışmıştır.

Bu yöntemde, hareketli koni yöntemindeki (Pana, 1965) gibi blokların oluşturduğu ve ocak şevlerini temsil eden konilerden faydalanılır. Ancak bu koniler hareketli koni

yönteminde olduğundan farklı olarak ters konilerdir. Bloğun oluşturduğu koninin uç kısmı blok üzerinde yer alır ve bloktan başlayarak aşağı doğru genişler. Aşağıda yer alan şekilde (Şekil 2.18) nihai sınırlar içerisinde yer alan bir blok ve bu bloğun oluşturduğu ters koni görülmektedir. Şekilde de görüleceği üzere bahsi geçen blok alınana kadar ters koni içerisinde yer alan herhangi bir blok alınamaz.

Yöntemin uygulanması aşamasında açık ocak nihai sınırları içerisinde yer alan her bir blok için ters koni oluşturulur. Oluşturulan konilerin kalite ağırlığı toplanıp ilgili bloğa yazılır. Bu konumsal ağırlık blokların çekici özelliği olarak kabul edilir. En yüksek konumsal ağırlığa sahip olan blok öncelikli olarak kazılır. Bu işlemten sonra konumsal ağırlıklar her bir koni için yeniden hesaplanır. Bu şekilde kazı sıralaması devam eder.



Şekil 2.18 : Ters koni (Gershon, 1987).

Genel olarak üretim planı problemini çözmeyi amaçlayan bu yöntemin adımları aşağıdaki gibidir;

- i. Açık ocak nihai sınırları belirlenir
- ii. Her bir blok için konumsal ağırlıklar hesaplanır
- iii. Maksimum değere sahip blok kazılır
- iv. ii no'lu adıma geri dönülür ve sistemde kazılacak blok kalmayıncaya kadar devam eder

Gershon (1987) benzer konumsal ağırlıklara sahip iki bloktan birinin yüzeye yakın diğerinin ise çok daha derinde olması durumunda bu iki blok arasında seçim yapmanın

hatalı olabileceğini ve bu yüzden basamak seviyelerine göre indirim faktörü uygulanması gerektiğini belirtmiştir. Böylece daha derinlerde yer alan bloklara daha düşük konumsal ağırlık verilecek ve sıralamada yüzeye yakın olan bloklar daha önce alınacaktır.

b) Wang ve Sevim yaklaşımı

Wang ve Sevim (1992), yukarıda bahsi geçen konumsal ağırlık yöntemini (Gershon, 1987) biraz daha geliştirerek açık ocak nihai sınırlarını da eşzamanlı olarak bulabilen aynı zamanda parametreleştirme yöntemlerinin dezavantajı olan aralık problemini ortadan kaldıran bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem sayesinde kontrol edilebilir ilerlemelerle ocaklar arasında geçiş sağlanabilmektedir. Yöntemin parametreleştirme yöntemi kadar optimuma yakın olduğu ve aynı zamanda parametreleştirme yöntemine göre daha hızlı olduğu belirtilmiştir.

Yöntemin en önemli avantajlarından biri de açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralaması probleminin eş zamanlı olarak çözülebilmesidir. Ancak hem açık ocak nihai sınırlarının hem de kazı sıralamasının optimum olduğu garantisi verilmemektedir.

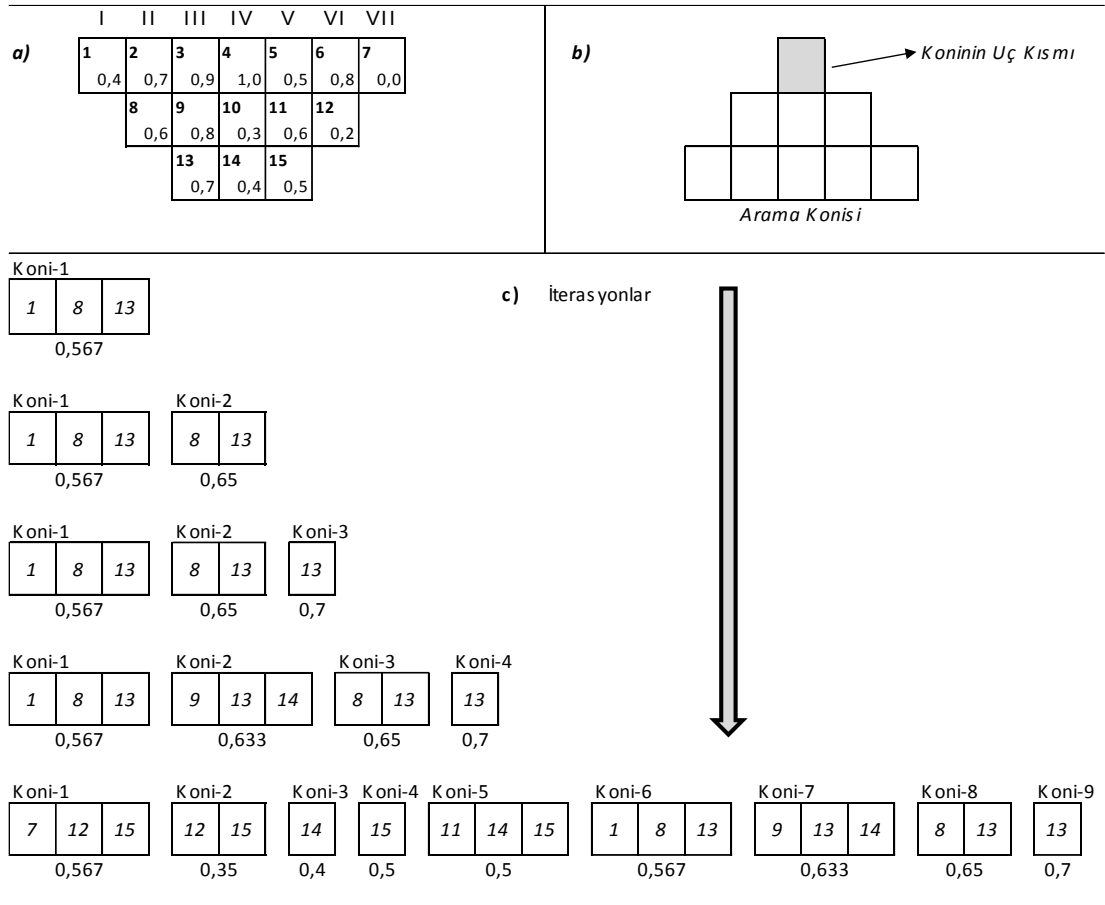
Bu yöntemin çözüm sunduğu problemlerden biri olan aralık problemi, parametreleştirme yöntemlerinin en büyük dezavantajı olarak bilinmektedir. Aralık probleminde birbirine ardışık iki iç içe ocak arasındaki büyüme istenilenden çok daha büyük olabilmekte ve bir iç içe ocaklar serisinde birden fazla görülebilmekte ve fazlar oluşturulurken zorluklar çıkarmaktadır.

Yöntemin ana prensibi, $M+N$ sayıda blok içerisinde maksimum metal içeriğine sahip olan M adet bloğu bulmaktır. Bunu yaparken ocak geometrisini koruyarak her iterasyonda blok sistemi içerisinde en az metal içeren N adet bloklar kümesini çıkarır. N adet minimum metal içeriğine sahip bloklar ters koni yardımıyla aranır. Hareketli koni yönteminin aksine ters koni kullanılmasının amacı minimum metal içeriğine sahip blokların sistemden ayıklanacak olmasıdır. Ters koni içerisinde bir veya birden fazla blok olabilir. N adet blok elde etmek için bir veya birden fazla koni içeriği birleştirilebilir. Ters koninin uç kısmı incelenen bloğun üzerine gelecek şekilde yerleştirilir ve sistemdeki bütün blokları dolaşır. Ters koni maksimum N blok içerebilir. Her iterasyonda bulunan minimum içeriğe sahip bloklar ortalama tenör içeriğine göre en düşükten en yüksek olanlara doğru sıralanır. Her iterasyonda elde edilen bloklar sistemden çıkarılarak değerler yeniden hesaplanır.

Yöntemin çalışma prensibi hipotetik bir blok model kesitinde örnek çözülerek gösterilmiştir (Şekil 2.19a). Basitlik sağlamak amacıyla şev açısı 45 derece ve bloklar kare şeklindedir. Amaç, boyut artışı 3 blok olan ve en küçük ocak boyutu en fazla 4 blok içeren maksimum metal ocaklarını bulmaktır. Diğer bir deyişle her periyotta 3 blokluk kazı yapılacak ve her iterasyonda maksimum 4 blok kazılabilecektir. Kesitte sütunlara numaralar verilmiştir. En soldaki 1. sütun olmak üzere toplam 7 sütun bulunmaktadır. Blokların sol üst köşesinde yer alan numaralar blokların sayısıdır ve her bloğun ismi olarak düşünülebilir. Aramada kullanılacak ters koninin şablonu şekilde (Şekil 2.19b) verilmiştir. Algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

1. Sütun-1'de en alttaki Blok-1 üzerine ters koninin uç kısmı yerleştirilir. Koni içerisinde kalan bloklar 1, 8 ve 13'tür. Ortalama tenör $(0,4+0,6+0,7) / 3 = 0,567$ olarak bulunur. Koni içerisinde yer alan blok sayısı 3 olduğu için ve bu sayı ocak boyut artışından (3 blok) büyük olmadığı için koni dizinin ilk sırasına kaydedilir (Şekil 2.19c).
2. Sütun-1'de başka blok olmadığı için Sütun-2'de yer alan en alttaki Blok-8 ile işleme devam edilir. Ters koni içerisinde kalan bloklar 8 ve 13'tür. Ortalama tenör 0,65'tir. Ortalama tenör bir öncekine göre daha yüksek çıktığı için dizide ikinci sıraya yerleştirilir (Şekil 2.19c).
3. Sütun-2'de bir üst sırada yer alan Blok-2'ye ters koni yerleştirilerek işleme devam edilir. Bu konide yer alan bloklar 2, 8, 9, 13 ve 14'tür. Ters koni içerisindeki toplam blok sayısı 4 olduğu için ve bu değer bizim boyut artışımızdan fazla olduğu için göz ardı edilerek Sütun-3'e geçilir.
4. Sütun-3'te en altta Blok-13 yer almaktadır. Buraya yerleştirilecek olan ters koni sadece Blok-13'ü içerir. Ortalama tenörü 0,7'dir. Diğer kaydedilmiş konilere göre daha yüksek değere sahip olduğu için dizide en son sıraya yerleştirilir.
5. Sütun-3'te bir üst sırada Blok-9 vardır. Ters koni içerisine 9, 13 ve 14 blokları düşer. Ortalama tenörü 0,633'tür. Dizide kaydedilmiş konilerden Koni-1 ve Koni-2 arasında ortalama değere sahip olduğu için Koni-2'nin yerine yerleştirilir. Buna bağlı olarak da eski Koni-2 ise artık yeni Koni-3, Koni-3 ise artık Koni-4 olur.

6. Yukarıda yapılan işlemler bütün sütun ve bloklar inceleninceye kadar devam eder. Artan ortalama tenöre göre dizilen koniler şekilde gösterilmiştir (Şekil 2.19c).
7. Dizide yer alan ilk koni 3 blok içermektedir (7, 12, 15). Bu ocak boyut artışı için gerekli olan miktar olduğu için bu koni içerisinde yer alan bloklar sistemden çıkarılır. Bu blokların çıkarılmasıyla elde edilen blok model kesitinde artık 12 blok vardır. (Şekil 2.20a)



Şekil 2.19 : Wang ve Sevim yöntemi adımları-1 (Wang ve Sevim, 1992).

Yukarıdaki işlemlerde ilk iterasyon için dokuz koni artan değerlere göre sıralanmıştır. Ancak amacımız minimum ortalama tenörü içeren toplam 3 bloğu bulmak olduğu için dizide sadece en düşük değere sahip birkaç koni yerleştirilmesi yeterlidir. Her konide bir blok bulunması gibi düşük olasılıklı bir durumda dahi ilk 3 koni birleştirilerek elde edilecek 3 blok yeterli olacaktır. İlk konide toplam 3 blok olması durumunda zaten dizideki diğer konilere ihtiyaç duyulmayacak ve en düşük değerli ilk koni sistemden çıkarılacaktır. Bu sebeple boyut artışı 3 blok olan bir planlamada iterasyon sürdürüldüğü sırada ilk 3 koniyi sıralamak ve her yeni koniyi bu 3 koni ile

karşılaştırmak yeterli olacaktır. Bu sayede işlem zamanı ve hafızadan tasarruf edilmiş olur.

I	II	III	IV	V	VI	VII
1 0,4	2 0,7	3 0,9	4 1,0	5 0,5	6 0,8	
	8 0,6	9 0,8	10 0,3	11 0,6		
		13 0,7	14 0,4			

a) 12 bloğa sahip maksimum metal içerikli ocak

Koni-1	Koni-2	Koni-3
14 0,4	10 0,467	13 0,5
	14	11 0,5

b) Tenör içeriğine göre sıralanmış ilk 3 koni

I	II	III	IV	V	VI	VII
1 0,4	2 0,7	3 0,9	4 1,0	5 0,5	6 0,8	
	8 0,6	9 0,8		11 0,6		

c) 9 bloğa sahip maksimum metal içerikli ocak

Koni-1	Koni-2	Koni-3
1 0,5	8 0,55	5 0,6
	11	8

d) Tenör içeriğine göre sıralanmış ilk 3 koni

I	II	III	IV	V	VI	VII
	2 0,7	3 0,9	4 1,0	5 0,5	6 0,8	
		9 0,8		11 0,6		

e) 7 bloğa sahip maksimum metal içerikli ocak

Koni-1	Koni-2	Koni-3
5 0,55	11 0,6	6 0,7
	11	11

f) Tenör içeriğine göre sıralanmış ilk 3 koni

I	II	III	IV	V	VI	VII
	2 0,7	3 0,9	4 1,0			
		9 0,8				

g) 4 bloğa sahip maksimum metal içerikli ocak

Şekil 2.20 : Wang ve Sevim yöntemi adımları-2 (Wang ve Sevim, 1992).

İlk iterasyonun sonucunda elde edilen 12 blok içeren model (Şekil 2.20a) üzerinde ikinci iterasyona başlanır. Yukarıda ayrıntıları verilen yöntem ile aynı adımları uygulayarak minimum koni değeri içeren ilk 3 koni dizisi şekilde verilmiştir (Şekil 2.20b). Bu şekilde görüldüğü üzere ilk iki koni içerisinde yer alan toplam 3 blok

(10, 13, 14) boyut artışı için yeterli olacaktır. Bu blokların sistemden çıkarılmasıyla elde edilen 9 bloklu model üzerinde algoritma adımları yeniden başlar (Şekil 2.20c). Bir sonraki iterasyonda 7 blok (Şekil 2.20e), daha sonraki iterasyonda ise 4 blok (Şekil 2.20g) sistemde kalır. Geriye kalan blok sayısı 4 veya daha az olduğu için işlemler sonlandırılır.

Şekilde (Şekil 2.20d) görüldüğü üzere Koni-1’de ve Koni-2’de 2 blok bulunmaktadır. Koni-1’in alınması durumunda ocak boyut artışı 1 blok eksik olacak, Koni-2 de alınır 1 blok fazla olacaktır. Bu şekilde + veya – olarak farkın aynı olduğu durumlarda ortalama tenörün daha düşük olduğu koni birleşimi seçilebilir. Sadece Blok-1 ve Blok-8’in alınması yeterlidir.

Sonuç olarak yukarıdaki örnekte geriye en son bırakılan 4 bloklu modelden başlanarak 7, 9, 12 ve 15 bloklu modellere geçiş yapılarak sırasıyla kazı gerçekleştirilebilir. Bu sıralamanın elde edilmesiyle aslında blok modelde yer alan maksimum metal içeriğe sahip olan en iyi 4, 7, 9 ve 12 bloklu ocaklar bulunmuş olur. Örneğin; 15 bloklu model içerisinde 7 blok kazılmak istenirse, yukarıdaki 7 bloğun vermiş olduğu metal miktarından daha fazla metal içeren 7 bloklu başka bir ocak bulunması olasılığı çok düşüktür.

Bu sezgisel yöntem Wang (1992) tarafından 129.500 bloklu gerçek bir modelde denenmiştir. Algoritma blok model üzerinde çalıştırılmadan önce gereksiz blokların atılması için başka bir algoritma kullanıldığı belirtilmiştir. Bu sınırlama ile blok sayısı 42.034’e düşürülmüştür. Ocak boyut artışı 800 ile 1400 blok arasındadır.

Karşılaştırma yapmak amacıyla aynı zamanda LG algoritması kullanılarak rezerv parametreleştirme yöntemi uygulanmıştır. Rezerv parametreleştirme bir deneme-yanılma yöntemidir. Her iterasyonda blokların tenör değerleri k miktarı kadar küçültülür ve LG algoritması ile nihai sınırlar bulunur. Kullanılan k değeri düşükçe nihai ocak sınırları genişler. Wang (1992) tarafından elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 : Sezgisel yöntem ve Rezerv Parametreleştirme yöntemi sonuçları.

Yöntem	Toplam Ocak Sayısı	Toplam Blok Sayısı	Toplam Cevher Bloğu Sayısı	Ortalama Cevher Tenörü (0,001 oz /ton)	İşlem Zamanı (dk)
Wang&Sevim Yöntemi	54	42,034	8,018	7.97	78
LGA ile Parametreleştirme Yöntemi	54	43,704	8,043	7.67	9,950

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere ve yazarların da belirttiği gibi, Wang ve Sevim (1992) tarafından önerilen yöntem rezerv parametreleştirme yöntemine göre çok daha kısa sürede optimum olmasa da optimuma yakın sonuçlar vermektedir.

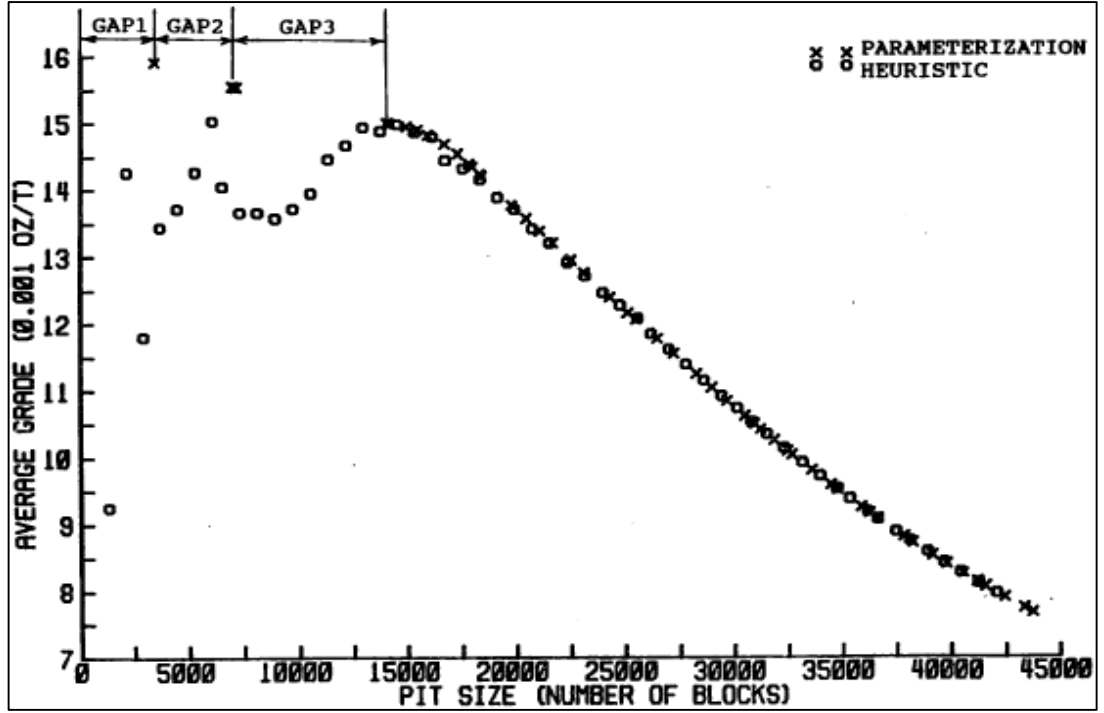
Kullanılan algoritma ile maksimum metal içerikli 54 ardışık ocak ve bu ocaklar arasında yaklaşık 800 blok içeren ilerlemeler elde edilmiştir.

Rezerv parametreleştirme yönteminde ise aralık probleminde dolayı düzensiz ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemelerden en büyüğü Ocak-4 ve Ocak-5 arasındaki 6863 blokluk atlamadır.

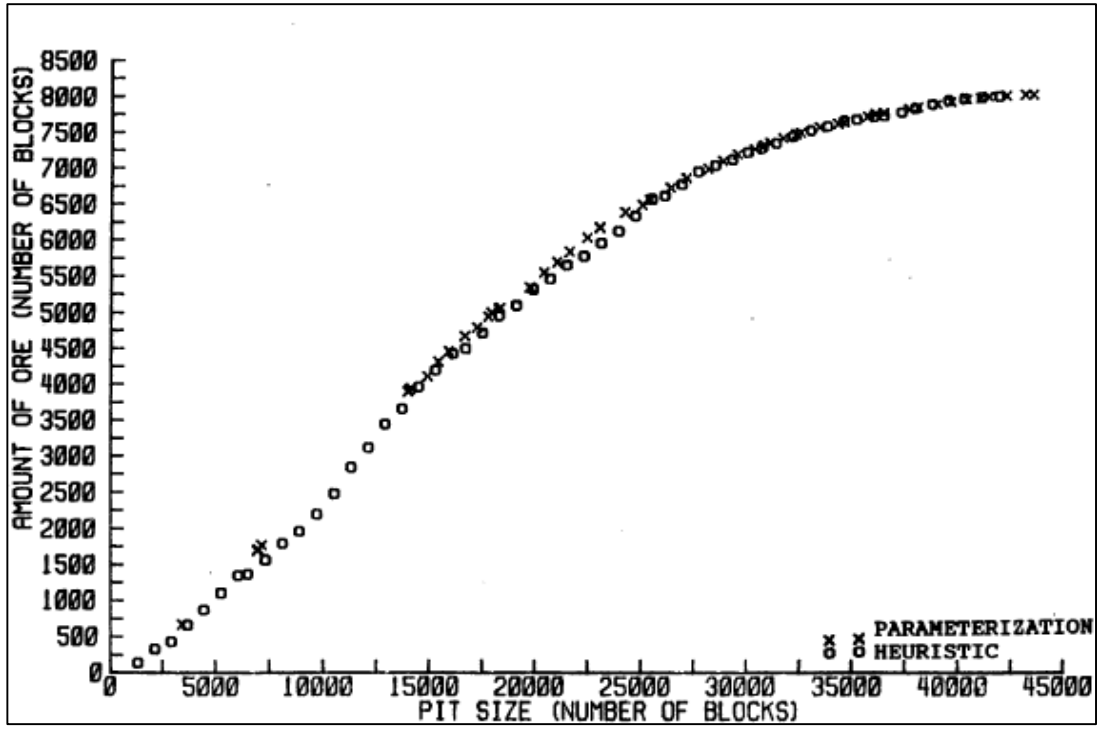
Kullanılan yöntemler arasındaki ilk karşılaştırma ocak ilerlemelerindeki metal içeriğidir. Aynı boyuttaki iki ocağın metal içeriklerinin birbiriyle karşılaştırılması için ortalama tenör – blok sayısı grafiği verilmiştir (Şekil 2.21). Her iki yönteminde yer aldığı grafikte de görüldüğü üzere rezerv parametreleştirme yöntemi ile elde edilen eğride 3 aralık problemi yer almaktadır. Sezgisel yöntemde ise ilerleme aralıkları neredeyse eşittir.

İkinci karşılaştırma cevher miktarı üzerine yapılacak olursa şekilde de (Şekil 2.22) görüleceği gibi sezgisel yöntemlerin oluşturduğu ocaklar içerisinde yer alan cevher blokları parametreleştirme yöntemi ile karşılaştırıldığında neredeyse aynıdır.

Üçüncü karşılaştırma ise üretim planlamasının yapılması için geçen işlem zamanı üzerinedir. Sezgisel yöntemin parametreleştirmeye göre çok daha hızlı planlama sonucu verdiği söylenebilir.



Şekil 2.21 : Rezerv Parametreleştirme ile Ortalama Tenör–Toplam Blok grafiği.



Şekil 2.22 : Rezerv Parametreleştirme ile Cevher Blokları–Toplam Blok grafiği.

Wang ve Sevim'in sezgisel yaklaşımının dezavantajları Thomas (1996) tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

- 1) Hareketli koni yönteminde olduğu gibi konilerin kesişim problemi devam etmektedir.

- 2) Ocak ilerlemeleri ters olarak geliştiği için ek kısıtların planlamaya dâhil edilmesi oldukça zordur.
- 3) Net bugünkü değerin maksimize edilmesi garanti değildir.

Sevim ve Lei (1994), Wang ve Sevim (1992) yaklaşımı ile elde edilen ardışık ocaklar serisinin optimum olarak sıralanabilmesi amacıyla dinamik programlamadan faydalanmışlardır.

2.3.2.4 Kümeleme yöntemi (clustering approach/fundamental tree)

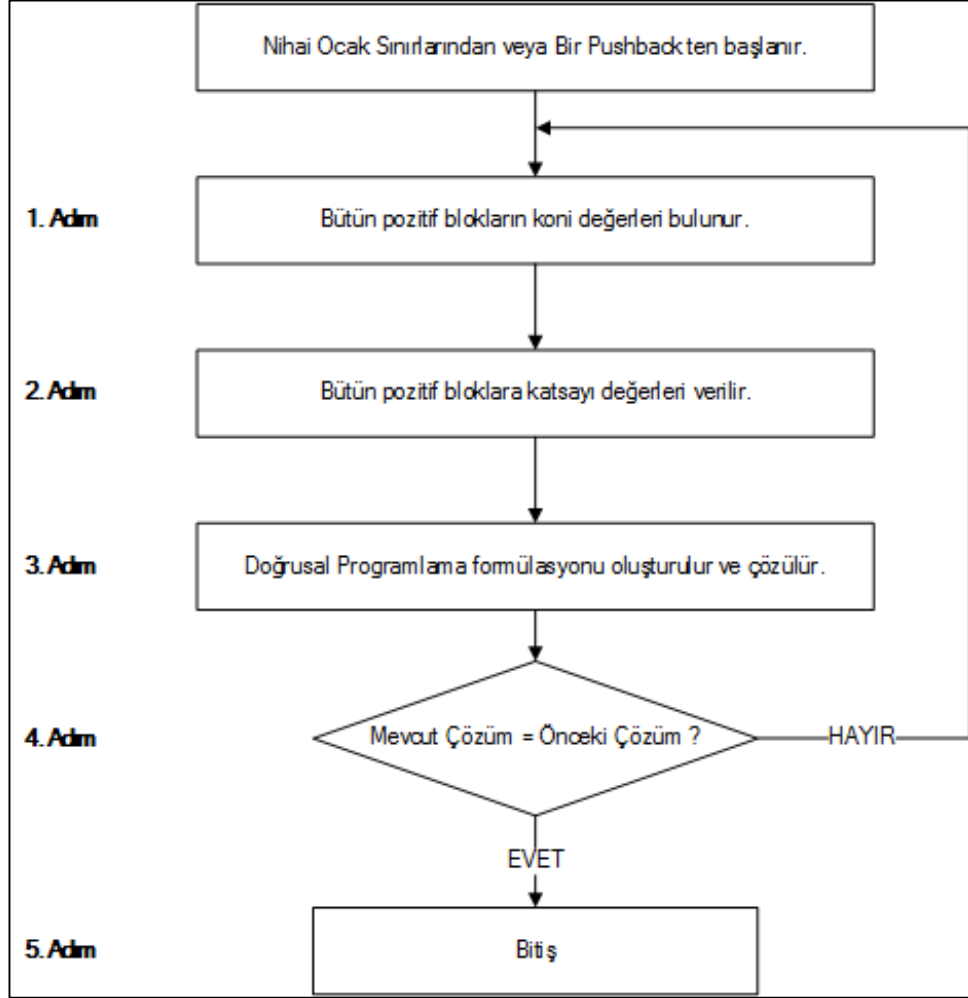
Uzun vadeli üretim planlaması yöntemlerinden biri de Kümeleme (Clustering) yöntemi olarak bilinen ve Ramazan ve diğ. (2005) tarafından önerilen yöntemdir. Kümeleme yönteminin amacı büyük çaptaki veri setinin nispeten daha küçük boyutlu kümeler setine dönüştürülmesidir. Ramazan ve diğ. (2005) bu işleme temel ağaç algoritması (Fundamental Tree Algorithm (FTA)) ismini vermişlerdir. FTA, optimaliteden ödün vermeden etkili bir şekilde blokları birleştiren ve ikili değer değişkenleri sayısını düşüren bir doğrusal programlama modelidir. Bloklar birleştirilirken üç kurala uygun olması özelliği aranır;

- i. Birleştirilen blokların toplam ekonomik değeri sıfırdan büyük olmalı
- ii. Birleştirilen bloklar ocak şev açılarını bozmadan uygun olarak çıkarılabilmeli
- iii. Birleştirilen bloklar i ve ii no'lu maddeleri yerine getiren daha küçük kümelere bölünmemeli

Yukarıdaki üç koşulu sağlayan blok ya da blok kümesi temel ağaç (fundamental tree (FT)) olarak adlandırılır. FTA ile açık ocaklarda üretim planlamasının adımları şekilde özetlenmiştir (Şekil 2.23).

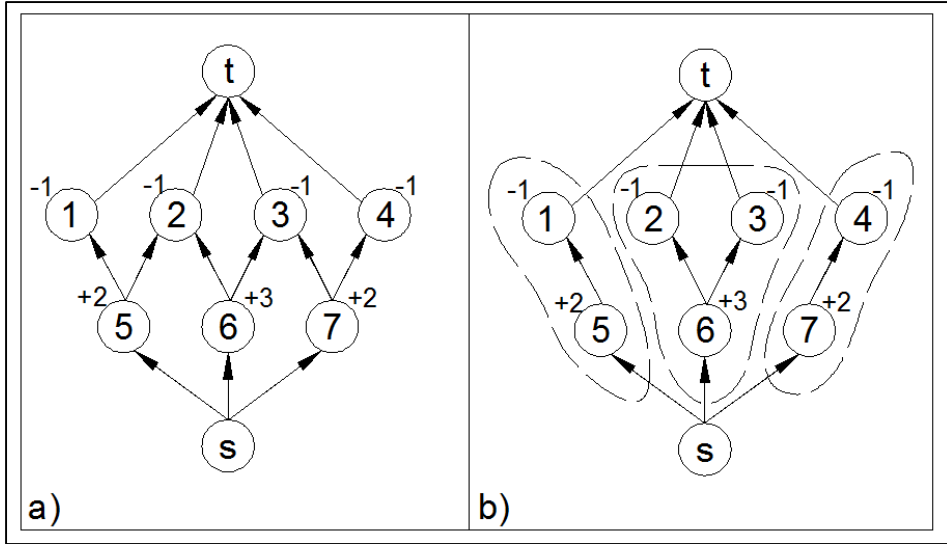
FT algoritmasında çözüm için doğrusal programlama modeli oluşturmadan önce ocak şev açılarını temsil eden bir koni oluşturulmalıdır. Birkaç faz oluşturulduktan sonra (cevher modelinin boyutuna bağlı olarak) her faz içerisinde FTA uygulanarak temel ağaçlar bulunur. Ağaçlar oluşturulurken sıfır veya negatif ekonomik değer içeren bloklar pasa blokları olarak düşünülür. Üretim planlaması aşamasında da sınır tenör kullanılarak her bir bloğun cevher veya pasa bloğu olup olmadığına karar verilir. Bir faz içerisinde yer alan temel ağaçlar arasındaki öncelik ilişkisi koni şablonu kullanılarak tespit edilir. Bu ilişki temel ağaçların hangisinin daha önce çıkarılacağını

belirler. Bu ağaçlar arasındaki kazı sıralaması operasyonel kısıtlar altında karışık tamsayı programlama modeli ile belirlenir.



Şekil 2.23 : Bir FT algoritmasının adımları (Ramazan ve diğ., 2005).

Her bir temel ağaç; içerisinde cevher tonajı, metal içeriği ve tenörü belirli olan bir blok olarak düşünülebilir. Büyük açık ocak işletmelerinde ocak sınırları içerisinde birçok temel ağaç bulunduğundan dolayı MIP modeli oluşturmak için çok fazla ikili değişken gerekmektedir. Bu dezavantajdan kurtulmak için ocak nihai sınırları içerisinde yer alan materyal geleneksel yöntemlerdeki gibi 3-5 faz şeklinde bölünebilir. Geleneksel metotlarda üretim planından önce eklenen nakliye yolları bu yöntemde yıllık üretim planı belirlendikten sonra eklenebilir. 2B bir blok modelin ağ gösterimi (Şekil 2.24a) ve bu modelin FTA ile çözülmüş hali şekilde (Şekil 2.24b) gösterilmiştir. Bu şekilde yer alan çözümde oluşturulan üç FT kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 2.24 : Bir Fundamental Tree örneği ve çözümü (Ramazan ve diğ. 2005).

2.3.2.5 Dal-Kesme yöntemi (branch and cut)

Karışık tamsayı programlama problemi olarak formüle edilebilen birçok optimizasyon problemi Dal-Kesme yöntemi ile çözülebilmektedir. Bu yöntem aslında kesme düzlemi (Cutting Plane) ve Dal-Sınır (Branch-Bound) algoritmalarının kombinasyonudur. Bu algoritmalar, tamsayı programlama probleminin gevşetilmesiyle oluşan doğrusal programlama dizisinin çözülmesi şeklinde çalışır. Genel olarak tamsayı programlama probleminin sadece kesme düzlemi algoritması ile çözülmesi mümkün olmadığından alternatif olarak optimum çözümü bulabilmek amacıyla dallandırma işleminin de yapılması gereklidir.

Caccetta ve Hill (2003) uzun dönem üretim planlaması problemlerini tamsayı programlama ile çözmek amacıyla Dal-Kesme algoritmasını kullanmışlardır. Uyguladıkları yöntemi C++ ile 17.000 satırlık yazılıma çevirmişlerdir. Ticarileştirme ve gizlilik anlaşmalarından dolayı algoritmanın detaylarını makalelerinde ayrıntısıyla anlatmamışlar ancak bazı özelliklerini özetlemişlerdir. Ayrıca makalede 209.664 blok içeren bir maden yatağını 10 dönem için planlamışlardır.

Yöntemin avantajı; maksimum düşey derinlik, minimum ocak tabanı genişliği, farklı cevher türlerine göre zenginleştirme kapasiteleri ve stok sahası gibi kısıtların optimizasyon modeline eklenebilmesidir. Yöntem, orta büyüklükteki açık ocak problemlerinde iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, büyük çaptaki problemlerde optimum sonuçları verememektedir. Diğer bir dezavantajı ise sınır tenörün optimize edilmemesidir (Osanloo ve diğ., 2008).

2.3.2.6 Benzetimli tavlama (simulated annealing)

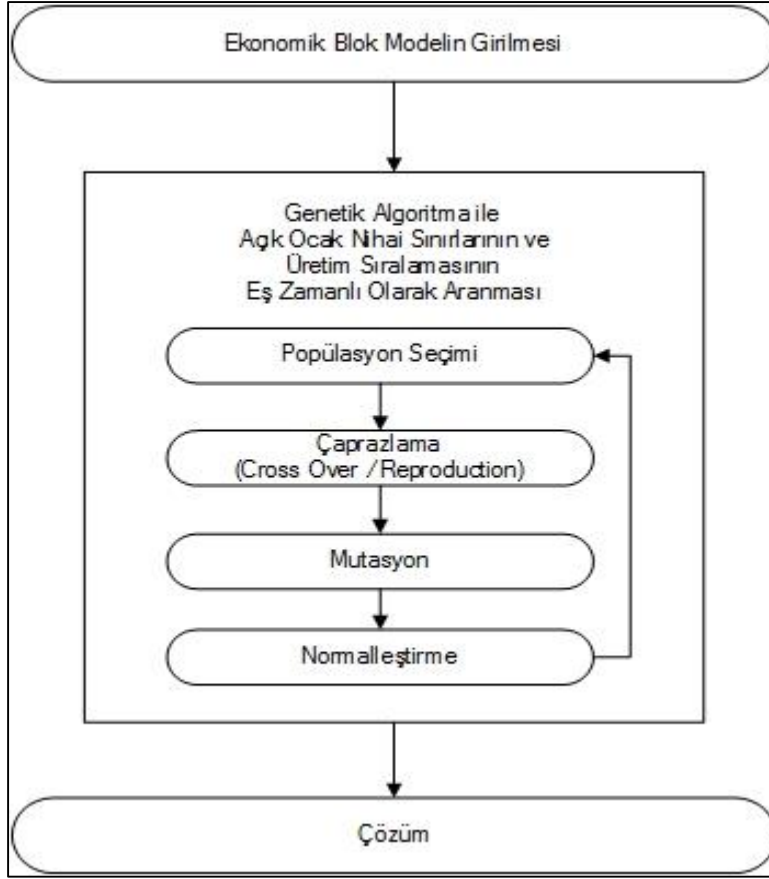
Kumral ve Dowd (2005) tarafından madenlerde üretim planlaması amacıyla benzetimli tavlama yaklaşımı kullanılmıştır. Problemi çözebilmek için dört aşamalı bir yol izlemişlerdir.

- i. Cevher yatağının mineral içeriğini belirlemek amacıyla öncelikli olarak jeostatistiksel simülasyon yapılır.
- ii. Sınır tenörün altında ve ocak sınırlarının dışında kalan bloklar sistemden çıkarılır.
- iii. Herhangi bir yöntem kullanılarak kısa bir süre içerisinde makul bir sub-optimum üretim planı elde edilir.
- iv. Benzetimli tavlama yöntemi kullanılarak sub-optimum üretim planı optimum ya da optimuma yakın bir hale getirilir.

2.3.2.7 Genetik algoritma

Denby ve Schofield (1994) açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralaması problemini eşzamanlı olarak çözebilmek için genetik algoritma yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemde rastgele seçilmiş olan başlangıç çözüm popülasyonu ile optimum çözümün aranılmasına başlanır. Daha sonra popülasyonda yer alan her bir bireyin uygunluk fonksiyonuna göre probleme çözümde faydalı olup olmadığı kontrol edilir. Uygunluk fonksiyonu; NBD'nin maksimize edilmesi, dekapajın minimize edilmesi, dekapajın yıllara göre dengelenmesi ya da cevher üretim miktarının ihtiyacı karşılaması gibi değişkenleri içerebilir. Ardından olasılık yöntemleri kullanılarak çözüm popülasyonu tekrar elde edilir. Optimum çözüm için faydalı olarak seçilmiş olan bireyler eşleştirilerek çözüm popülasyonu daha da optimuma yaklaştırılır. Bu işleme çaprazlama denilir ve bu işlemten sonra muhtemelen daha optimum yeni birey popülasyonu elde edilir. Elde edilen ocak popülasyonunun mutasyon ve ardından normalleştirme işleminden geçirilmesinden sonra bölgesel olarak iyileştirmeler yapılarak algoritma sonlandırılır.

Yöntemin adımları Sattarvand ve Niemann-Delius (2013) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 2.25).



Şekil 2.25 : Üretim planlamasında Genetik Algoritma yönteminin adımları.

Yöntemin avantajları ve dezavantajları Osanloo ve diğ. (2008) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir;

Avantajları;

- Genetik algoritma değişkenlerinin (popölasyonun boyutları, çaprazlama olasılıkları, mutasyon olasılığı ve uyumluluk fonksiyonu) iyi tanımlanması durumunda; kabul edilebilir bir zaman diliminde iyi sonuçlar vermektedir.
- Esnek bir yöntemdir.
- Ocak nihai sınırlarını ve üretim sıralaması problemlerini eş zamanlı olarak çözebilmektedir.

Dezavantajları;

- Ocak hacmine bağlı olarak değişen birim maliyetin etkisini hesaba katmamaktadır.
- Yöntemin stokastik doğası nedeniyle sonuçlar bir çalışmadan diğerine farklılık gösterebilmektedir.

3. YÖNTEM

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması amacıyla kullanılması düşünülen bu yöntemde amaç; belirli bir periyotta, belirli kısıtlar altında birim blok kazısı başına elde edilen kazancı optimize ederek ocağın ömrü sonunda maksimum net bugünkü değerini elde etmek ve eş zamanlı olarak da ocak nihai sınırlarını belirlemeye çalışmaktır. Bu işlemleri yapabilmek amacıyla aranan blok kümelerinin bulunması için sezgisel bir yöntem olan klasik hareketli koni yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin bu çalışmada ayırt edilebilmesi amacıyla Gelişmiş Hareketli Koni yöntemi ismi kullanılmıştır. Yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi ve güvenilirliğinin sınanması için örnekler üzerinde uygulama yapılmış ve diğer yöntemlerle karşılaştırma yoluna gidilmiştir.

3.1 Yöntemin Genel Özellikleri

Açık ocaklarda nihai sınır tespiti ve üretim sıralaması problemlerinde uygulanması düşünülen bu yöntemin sağlayabileceği en önemli avantajlar aşağıda belirtilmiştir;

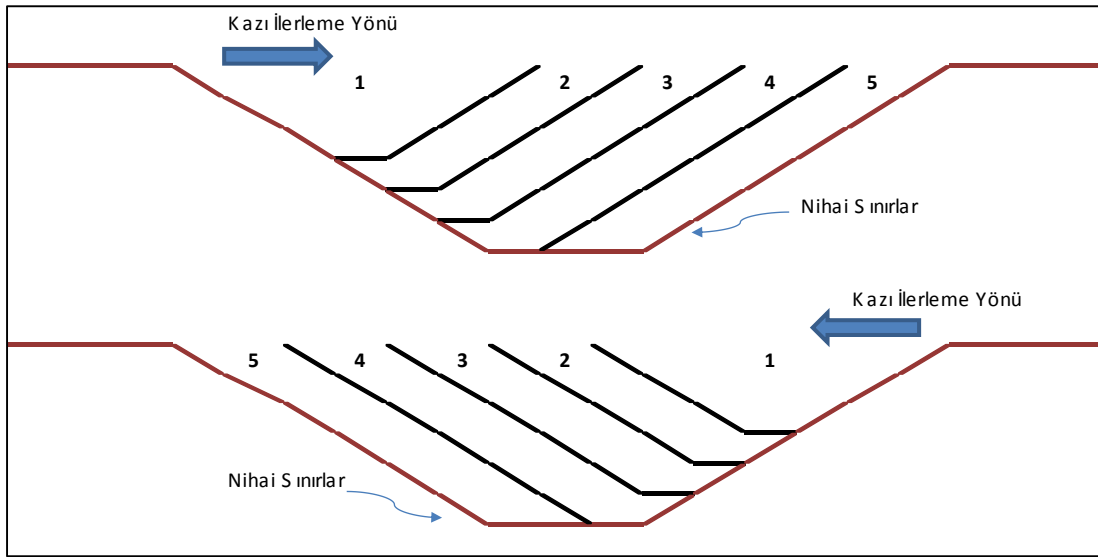
- Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesi ile eş zamanlı olarak üretim sıralamasının da yapılabilmesi
- Açık ocak nihai sınırlarının tespitinde sıklıkla kullanılan ve optimum sonuçlar veren LG algoritmasına alternatif olabilecek doğrulukta nihai sınır tespiti yapılabilmesi
- Üretim sıralaması yapılırken; her dönem için minimum kazı ile maksimum kazancı elde etmeye çalışarak net bugünkü değer de maksimize edilebilmesi
- Gerektiğinde; şev açısı, yıllık üretim miktarı, cevher hazırlama tesisine beslenecek ortalama tenör, metal miktarı vb. benzer kısıtların kolaylıkla entegre edilebilecek olması
- Anlaşılması, kullanılması ve programlanması kolay bir yöntem olması

3.2 Yöntemde Kullanılacak Olan Bazı Kavramlar

Yöntemin ayrıntılarının açıklanmasından önce, yöntemde sıklıkla kullanılacak olan bazı kavramların ve bunların ne kadar etkili olduğunun belirtilmesi gereklidir.

3.2.1 Net bugünkü değer, önemi ve maksimizasyonu

Üretim planlamasında net bugünkü değerın hesaplanması işletmenin ekonomik olup olmaması konusuna büyük katkı sağlar. Kazı sıralaması üretim planlaması açısından önemlidir. Bu önemi belirtmek için şekilde (Şekil 3.1) görüldüğü gibi bir örnek verilmiştir. Bu örnekte aynı cevher yatağında iki farklı alternatif düşünülerek kazı sıralaması oluşturulmuştur.



Şekil 3.1 : İki farklı kazı alternatifi

Bu alternatiflerde kazı yönü birbirinin tam zıttıdır. Her bir faz (phase, pushback) içerisinde ne kadar kazanç elde edileceği tabloda (Çizelge 3.1) verilmektedir. Toplam 5 yıl sonunda faz değerleri toplandığında iki alternatifte de 4.000 TL toplam kazanç gözükmesine rağmen paranın zaman değeri göz önüne alındığında alternatiflerin birbirinden çok farklı olduğu ortaya çıkacaktır. Yıllık iskonto oranı %10 olduğunu farz edersek bu iki farklı kazı sıralamasının NBD'leri hesaplandığında birinci alternatifi daha doğru bir seçenek olduğu görülmektedir.

Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı üretim planlamasında net bugünkü değerin maksimize edilmesi için uğraşılır. Net bugünkü değerin maksimizasyonu için de değerli olan cevherin öncelikli olarak kazılması gereklidir. Kısıtlar da göz önünde

bulundurularak her bir dönemde en çok kazanç sağlayacak blok kümelerinin çıkarılması gereklidir.

Çizelge 3.1 : İki kazı alternatifi için faz değerleri ve NBD değişimi.

<i>Faz (Pushback)</i>	<i>1. Alternatif Faz Değeri (TL)</i>	<i>2. Alternatif Faz Değeri (TL)</i>	<i>1. Alternatif İskontolu Faz Değeri (TL)</i>	<i>2. Alternatif İskontolu Faz Değeri (TL)</i>
1	1.000	600	909	545
2	900	700	744	579
3	800	800	601	601
4	700	900	478	615
5	600	1.000	373	621
<i>Toplam</i>	4.000	4.000	3.105	2.961

3.2.2 Birim kazı başına düşen kazanç ve NBD maksimizasyonu ilişkisi

Bölüm 2’de de özetlendiği gibi; net bugünkü değer (NBD), t periyodunda elde edilen kazancın belirli bir iskonto oranı ile günümüzdeki değere indirgenmesidir (Eşitlik 2.44). NBD maksimizasyonu ise gelecek bir zamandaki kazancın, paranın zaman değerini göz önünde bulundurarak bugünkü değere göre maksimize edilmesi işlemidir.

$$NBD = \frac{Kazanç}{(1 + iskonto\ oranı)^t} \quad (2.44)$$

Üretim planlamasında NBD’yi maksimize etmek için aşağıdaki maddelerin yerine getirilmesi önem arz etmektedir;

- Daha değerli olan cevherin öncelikli olarak elde edilmesi
- t periyodundaki kazancın maksimize edilmesi

Bu maddeler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.2.2.1 Değerli cevherin öncelikli olarak elde edilmesi

Net bugünkü değer maksimizasyonunda kazı sıralamasının etkisi çok büyüktür. Bunun sebebi eşitliğin (2.44) paydasında yer alan t periyodudur. t değerinin düşük olması paydada yer alan değeri düşürür ve böylece NBD artar. Bu nedenle; ekonomik kazancı yüksek olan blok kümelerinin sonraki yıllara bırakılması yerine öncelikli olarak kazılması NBD’yi arttırmaktadır.

Örnek olarak; %12 iskonto oranı kabul edilerek blok sayılarının ve kazancın eşit (1.000 TL) olduğu iki farklı blok kümesi A ve B olsun. Bu blok kümelerinden A kümesinin 3 yıl sonra B kümesinin 7 yıl sonra alınacağını düşünersek; A blok kümesinin net bugünkü değeri $NBD_A=1000/(1.12)^3=711,78$ TL olacak; B blok kümesinin net bugünkü değeri ise $NBD_B=1000/(1.12)^7=452,35$ TL olacaktır.

Bu nedenle; belirlenen kısıtlara uygun olan değerli blok kümelerinin mümkün olduğunca öncelikli olarak ocaktan çıkarılması ve nakit akışına bir an önce eklenmesi gereklidir. Diğer bir deyişle üretim sıralamasında değerli olan cevherin öncelikli olarak kazılması önem arz eder.

3.2.2.2 t dönemindeki kazancın maksimize edilmesi

Herhangi bir t periyodundaki kazancın maksimize edilmesi eşitlikteki (2.44) kesirin pay kısmının yüksek tutulması demektir. Üretim planlamasında, herhangi bir t periyodundaki kazancı maksimize etmek, t periyodundaki kazıda aynı hacime sahip blok kümelerinden (üretim miktarı kısıtı) daha fazla kazanç elde edilen blok kümesinin kazılması anlamını taşır. Burada sadece kazısı yapılacak dekapaj bloklarına değil kazılacak malzemenin tamamına bakmak gereklidir. Bu nedenle ekonomik içeriğinin yüksek olmasının yanında bu ekonomik içeriği elde edebileceğimiz kazı miktarının da düşük olması önem teşkil eder.

Örneğin; aşağıdaki şekilde (Şekil 3.2) yer alan blok model kesitinde blokların ekonomik değerleri verilmiştir. Bu modelde yer alan 3I bloğunu alabilmek için bu blok üzerinde oluşturulan konide yer alan blokların çıkarılması gereklidir (Şekil 3.3). Bu blok kümesinde 3I bloğu da dâhil olmak üzere toplam 9 blok vardır ve blokların toplam ekonomik değeri 11 TL'dir. Aynı blok model kesitinde (Şekil 3.2), 4G bloğunu inceleyecek olursak (Şekil 3.4); bu bloğun oluşturduğu konide toplam 16 blok vardır ve bu blokların toplam değeri yine 11 TL'dir. Bu durumda; 16 blok kazarak 11 TL elde etmek yerine 9 blok kazarak 11 TL elde etmek daha mantıklı bir seçenek olacaktır. Burada; birim blok kazısı başına düşen ekonomik değer 3I blok kümesi için 1,22 TL, 4G blok kümesi için ise 0,69 TL'dir. Bu değerler ayırt edici özellik olarak değerlendirilebilir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	-1	-1	-1	-1	2	-1	2	2	1	3	2
2	-1	1	2	1	2	2	-1	1	-2	1	-2
3	-2	-1	3	2	3	-2	1	1	1	-1	-1
4	-2	1	1	1	1	2	1	1	1	-1	-1
5	-2	-2	1	-2	-2	1	1	-1	-2	-2	-2

Şekil 3.2 : Blok model kesiti.

	G	H	I	J	K
1	2	2	1	3	2
2		1	-2	1	
3			1		

Şekil 3.3 : 3I bloğunun oluşturduğu koni içerisinde kalan bloklar.

	D	E	F	G	H	I	J
1	-1	2	-1	2	2	1	3
2		2	2	-1	1	-2	
3			-2	1	1		
4				1			

Şekil 3.4 : 4G bloğunun oluşturduğu koni içerisinde kalan bloklar.

Sonuç olarak; açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması yapılırken net bugünkü değerin hesaplanması ve bu değerin maksimize edilebilmesi çok önemlidir. Bu nedenle belirli hacme sahip olan blok kümeleri arasından ekonomik olarak en değerli olanının seçilmesi ve üretim sıralaması yaparken en değerli olan blok kümelerine öncelik verilmesi gereklidir.

3.2.3 Birim blok kazısı başına düşen ekonomik değer (BEVPB)

Yukarıda bahsi geçen maddeler göz önünde bulundurulduğunda; üretim sıralamasının sağlıklı olarak yapılabilmesi ve net bugünkü değerin maksimize edilebilmesi için her t döneminde, birim blok kazısı başına düşen ekonomik değerin en yüksek olduğu blok kümesinin aranması gerekmektedir. Bu işlemi basit bir şekilde gerçekleştirebilmek için; blok kümesinde yer alan blokların toplam ekonomik değerleri, kazılacak toplam blok sayısına bölünür. Elde edilen değerler incelenerek blok kümeleri arasından tercih yapılabilir. Öyleyse; bir blok kümesinin kazısında birim blok başına düşen ekonomik değer (2.45) aşağıdaki gibi verilebilir.

$$BEVPB = \frac{TBEV}{TBN} \quad (2.45)$$

Burada;

BEVPB : Blok başına düşen ekonomik değer, (TL/blok)

TBEV : Toplam ekonomik değer, (TL)

TBN : Toplam blok sayısı

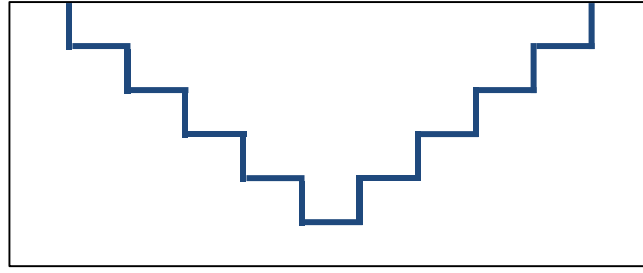
Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı, bu tezde yer alan yöntem kullanılırken kazı ilerlemeleri için blok kümelerinin aranmasında *BEVPB* değerleri kullanılacaktır. Bu değerlerin belirlenebilmesi için arama işlemlerinde hareketli koni kullanılacaktır.

3.2.4 Hareketli koni analizi ve arama konisi

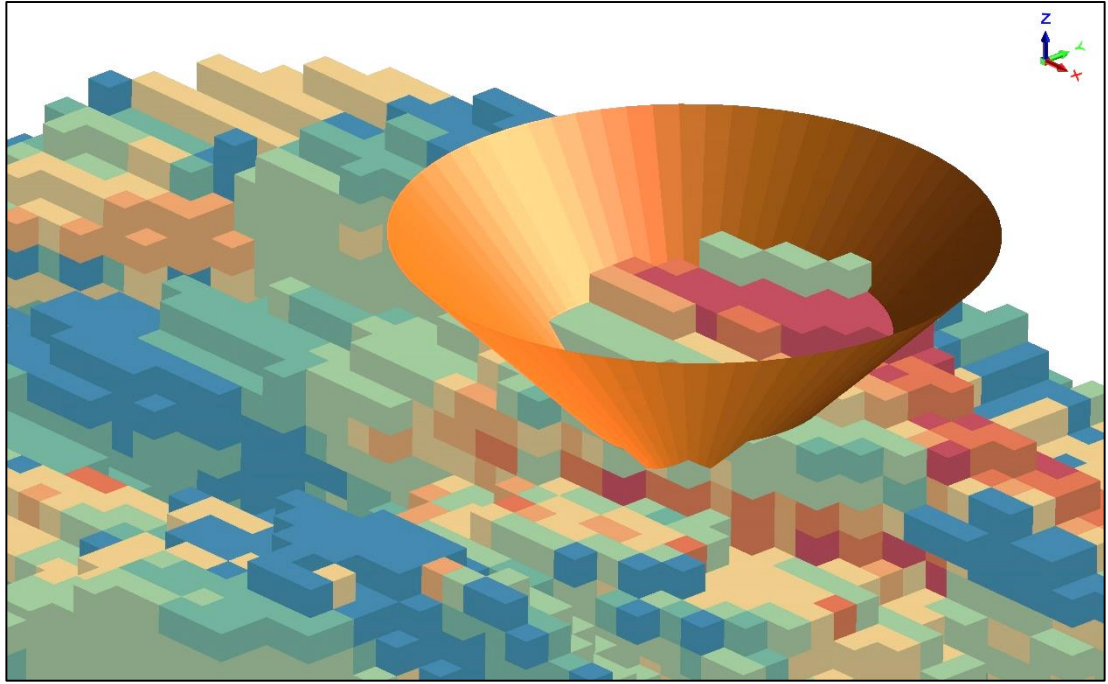
Hareketli koni analizi, kazılabilecek blok kümelerinin incelenmesi ve uygun olan blok kümesinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Bu analizler için arama işlemlerinde kullanılacak “arama konisi” aşağıdaki şekillerde görülmektedir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).

Arama konisinin uç kısmı blok model içerisinde kalan her bir bloğun (cevher veya dekapaj) üzerinde durur ve o bloğun alınabilmesi için şev açlarına uyarak üzerindeki hangi blokların alınması gerektiğini belirler. Örneğin; aşağıda görülen şekilde yer alan bir kesitte 4F bloğunun kazılması için gerekli olan bloklar, o blok üzerinde konumlanan koni içerisinde kalan bloklardan oluşmaktadır (Şekil 3.7). Belirlenen blok kümesindeki bütün blokların ekonomik değerleri toplanır. Ardından da arama konisinin uç kısmı hangi blok üzerinde ise o bloğa, blok kümesinin toplam ekonomik değeri olarak yazılır. Böylece her bir bloğa bakıldığında, o bloğun alınması durumunda kazılacak blok kümesinin toplam ekonomik değeri görülmüş olacaktır. Arama konisinin bloklar arasındaki dolaşım sırası önemli değildir.

Hareketli koni sayesinde blokların ekonomik değerlerinin hesaplanabilmesinin yanında blok kümesinde yer alan blokların herhangi bir özelliği (ortalama tenör, hacim, metal miktarı, yoğunluk vs.) hesaplanıp analiz edilebilir ve diğer blok kümeleri ile karşılaştırılabilir.



Şekil 3.5 : Temsili 2B arama konisi.



Şekil 3.6 : Temsili 3B arama konisi.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	-1	-1	-1	-1	-1	2	-1	2	1	1
2	-1	2	1	0	2	1	2	-1	2	-2
3	-2	-1	1	2	2	-2	-2	1	-1	1
4	0	0	0	1	1	1	-1	1	2	1

Şekil 3.7 : 4F bloğundaki arama konisi.

3.2.5 Negatif koni ve blok kümesi optimizasyonu

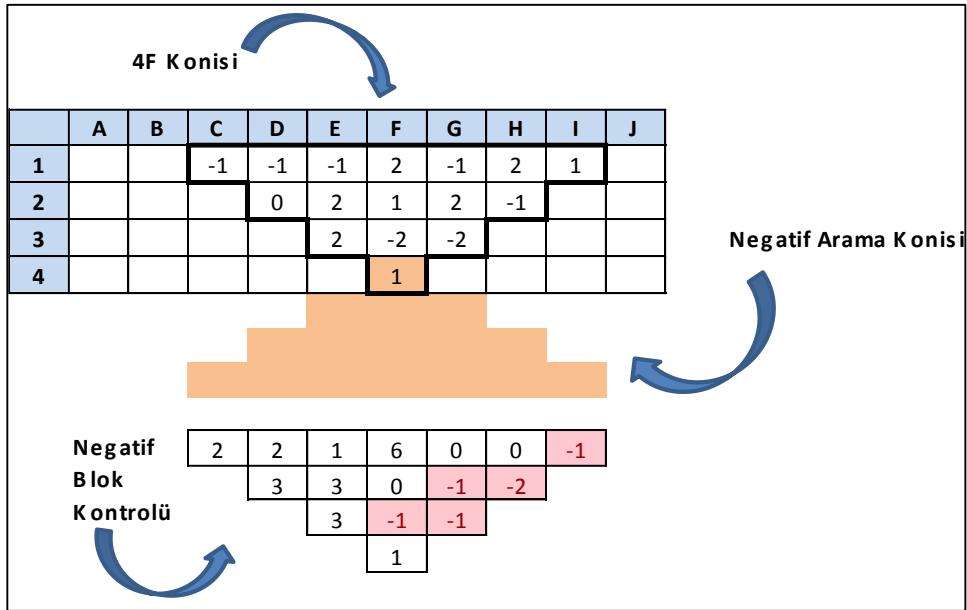
Bloklar üzerinde konumlanan ve uç kısmı aşağıya bakan koni literatürde pozitif koni olarak geçmektedir. Pozitif koniler, bazen içerisine alınmaması gereken negatif blokları da almakta bu yüzden de optimumdan uzaklaşan blok kümeleri oluşturmaktadırlar. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için negatif koni ile blok kümelerinin optimizasyonu yapılabilir. Negatif koni sayesinde, şev açıları bozulmadan pozitif koni içerisindeki negatif veya sıfır değerli bloklar çıkarılabilir.

Örneğin; şekilde (Şekil 3.7) görülen 4F bloğunun oluşturduğu blok kümesi aşağıda verilmiştir (Şekil 3.8). Bu konide yer alan 16 bloğun toplam ekonomik değeri +4'tür.

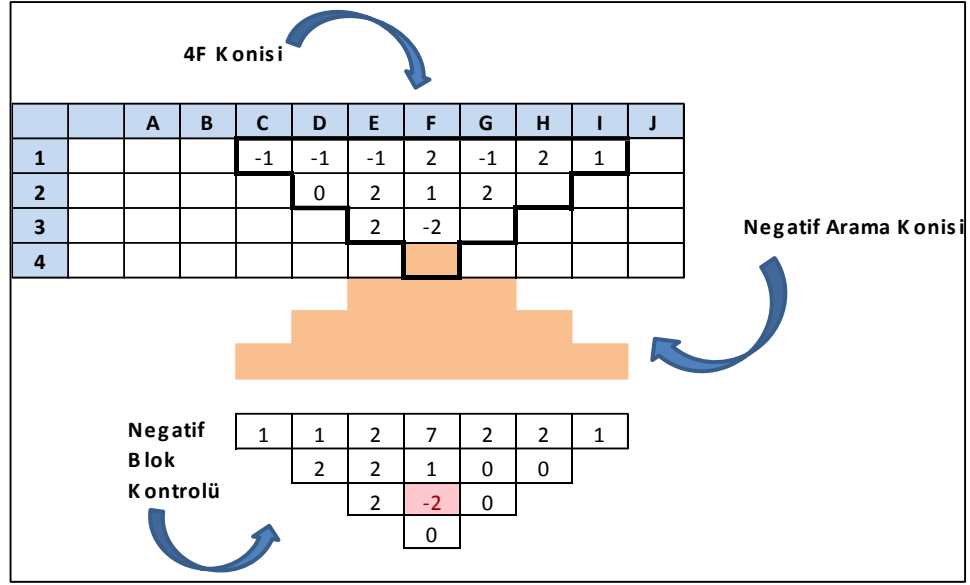
	C	D	E	F	G	H	I
1	-1	-1	-1	2	-1	2	1
2		0	2	1	2	-1	
3			2	-2	-2		
4				1			

Şekil 3.8 : 4F bloğunun oluşturduğu blok kümesi.

Negatif arama konisi ile 4F blok kümesi içerisindeki her bir blok üzerinde inceleme yapılır ve blok değerlerinin toplamı hesaplanır (Şekil 3.9). İncelenen blokların oluşturduğu blok kümeleri arasında sıfır veya negatif değerli blok kümeleri aranır. Şekilde görülen negatif değerler, 4F konisinin içerisinde kazılmaması gereken negatif bloklar olduğunu göstermektedir. Negatif koni ile oluşturulan blok kümeleri arasında en düşük değerlisi, 2H bloğunun oluşturduğu blok kümesidir. Toplam ekonomik değeri -2 olan bu blok kümesi 2H (-1), 3G (-2) ve 4F (+1) bloklarından oluşur. Pozitif koninin oluşturduğu blok kümesinden bu bloklar çıkarıldığında toplam blok ekonomik değeri 2 birim artacaktır. Blokların toplam ekonomik değerini düşüren bu üç bloğun pozitif koniden çıkarılmasıyla toplam ekonomik değer +4'ten +6'ya çıkar (Şekil 3.10).

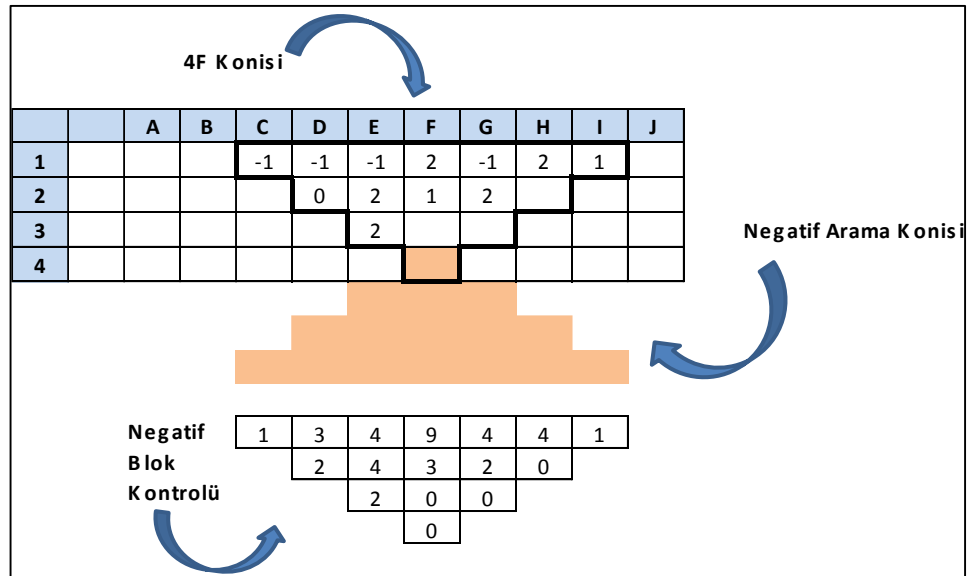


Şekil 3.9 : Negatif arama konisi.



Şekil 3.10 : Negatif arama konisi 2.adım.

Negatif değere sahip blokların çıkarılmasıyla elde edilen yeni blok kümesinde, negatif koni ile bir daha arama yapılır. Böylece pozitif blokların toplam ekonomik değerini düşüren -2 ekonomik değerine sahip 3F bloğunun da pozitif koni içerisinde alınması gerektiği görülmektedir. 3F bloğunun da pozitif koni içerisinde çıkarılmasıyla (Şekil 3.11) pozitif koni içinde kalan blok kümesinin ekonomik değerinin +8 birim olduğunu görülür. Böylece kazançlı olmasına rağmen 16 blok kazıp 4 birim ekonomik değer elde etmek yerine 12 blok kazıp +8 birim ekonomik değer elde etmek daha avantajlı olacaktır (Şekil 3.12).



Şekil 3.11 : Negatif arama konisi 3.adım.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1			-1	-1	-1	2	-1	2	1	
2				0	2	1	2			
3					2					
4										

Şekil 3.12 : 4F konisinin optimize edilmiş hali.

Pozitif koni ile elde edilen blok kümeleri içerisinde negatif veya sıfır değerli blokların aranmasında kullanılan negatif koninin yapısı, pozitif koninin yapısının yatay eksene göre simetriği olduğundan dolayı gereksiz bloklar çıkarılırken şev açıları korunmaktadır.

Blok kümesi optimizasyonunun yapılmaması her ne kadar küçük bir ayrıntı gibi gözükse de, bu küçük ayrıntı bazen optimum nihai sınırların hareketli koni yöntemiyle bulunamamasına neden olur. Ayrıca işletmenin öncelikli olarak kazanması gereken değerli metal bloklarının sonraya bırakılmasına neden olur. Çünkü kazısı yapılan negatif ve sıfır değerli blokların her biri, t zamanı içerisinde kazılması gereken pozitif değerli bir bloğun kazılmasının önüne geçecektir. Bu iki açıdan düşünüldüğünde koni optimizasyonunun iki ana faydası bulunmaktadır ve bu çalışma kapsamında koni optimizasyonunun bu avantajlarından faydalanılacaktır.

3.2.6 Pozitif arama konisi tabanının genişletilmesi

Pozitif koni ile blok kümelerinin incelenmesinden sonra maksimum BEVPB değerinin pozitif olmaması durumunda ocaktaki tüm blokların tam anlamıyla gözden geçirilmesi amacıyla ve hareketli koninin dezavantajlarından olan blok kombinasyonlarının hesaba katılamaması problemine çözüm olması amacıyla pozitif koni tabanı adım adım genişletilir. Bu ihtiyaç genellikle ocağın son yıllarında alınacak olan ve blok modelin alt kotlarında yer alan blokların üretimi esnasında doğar.

Hareketli koninin hata yaptığı durumlardan birisi olan bu problem Wright (1990) tarafından detaylı olarak verilmiştir. Bu durum aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.13). Bu şekilde hareketli koni aramasında 3C ve 3E kümesinde pozitif değerli bir blok kümesi bulunamamaktadır. Ancak bu iki blok kümesi birlikte düşünüldüğünde üzerlerindeki negatif blokların yükünü paylaşacakları için +1 değerlikli bir blok kümesi oluşturmuş olacaklardır. Bu dezavantajdan kurtulmak amacıyla blokların

tamamının kontrol edilebilmesi için aşağıda görüldüğü gibi arama konisinin tabanı, ihtiyaç duyulduğunda genişletilir.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	
3	-3	-3	6	-2	7	-3	-3	Blok E ekonomik Değerleri

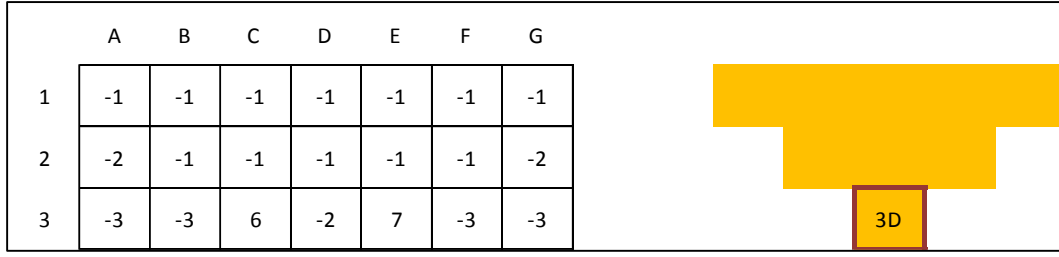
	A	B	C	D	E	F	G	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	
3	-3	-3	6	-2	7	-3	-3	3C Bloğunun Oluşturduğu Koninin Toplam E ekonomik Değeri V = -2

	A	B	C	D	E	F	G	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	
3	-3	-3	6	-2	7	-3	-3	3E Bloğunun Oluşturduğu Koninin Toplam E ekonomik Değeri V = -1

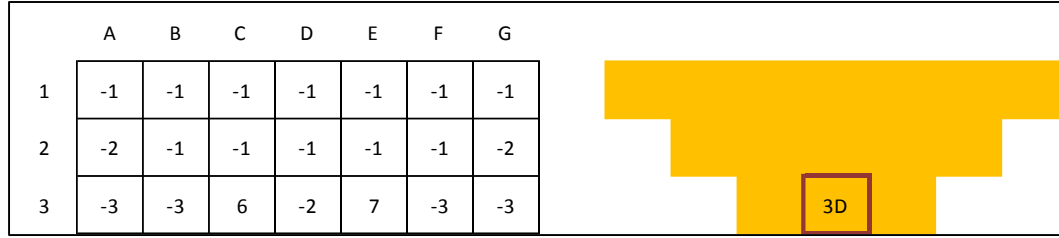
	A	B	C	D	E	F	G	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	
3	-3	-3	6	-2	7	-3	-3	3C ve 3E blok kümesi beraber düşünülseydi toplam ekonomik değer V = +1

Şekil 3.13 : Hareketli koni hatası için örnek.

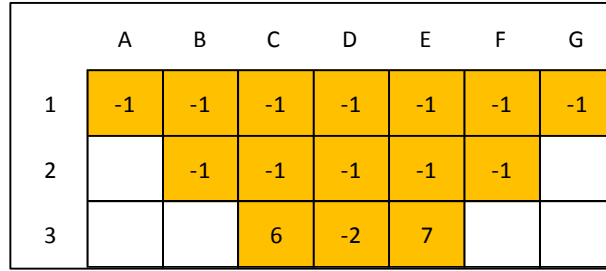
Koni tabanının genişletilmesi ile daha geniş çapta blok kümeleri aranabilecek ve de sonrasında negatif koni ile optimizasyonu yapıldığında ortaya pozitif ekonomik değere sahip blok kümeleri çıkabilecektir. Yukarıdaki örnek (Şekil 3.13) ele alınırsa; genişletilmemiş pozitif koni ile incelendiğinde (Şekil 3.14) 3D bloğunun ekonomik değeri -14 birim olmaktadır ve negatif koni ile optimizasyonu mümkün değildir.



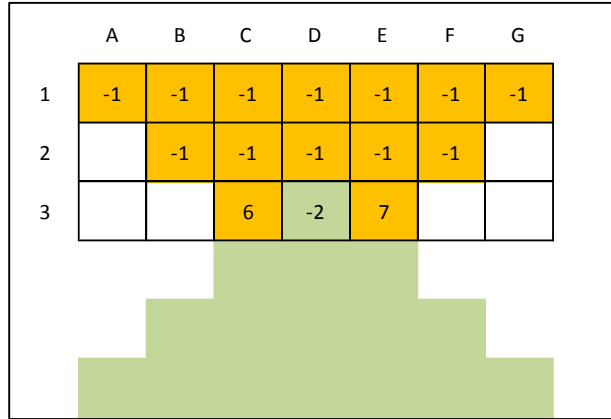
Şekil 3.14 : 3D bloğunun oluşturduğu koni.



Şekil 3.15 : 3D bloğunun oluşturduğu genişletilmiş koni.



Şekil 3.16 : 3D blok kümesinin içerisinde kalan bloklar.



Şekil 3.17 : 3D blok kümesinin optimize edilmiş hali.

Yine 3D bloğu genişletilmiş koni tabanı ile incelenirse (Şekil 3.15) toplam değerinin -1 birim olduğu (Şekil 3.16) ve sonrasında negatif koni ile optimize edildiğinde (Şekil 3.17) toplam değer +1 birim olduğu görülmektedir.

Hareketli koninin bu dezavantajını yok etmek için arama konisinin tabanını genişletmek yerine blok modelin altına ilaveten negatif değerli bloklar da eklenebilir. Böylece arama konisi mevcut blok modelden daha derinlerde inceleme yapabilecek ve

blok kombinasyonlarını hesaba katabilecektir. Böyle bir uygulamadan elde edilen sonuç ile koni tabanının genişletilmesi ile elde edilen sonuç aynı ve verimli olacaktır. Ancak böyle bir durumda blok sayısının artmasından dolayı işlem süresinin uzaması gibi bir dezavantaj beraberinde gelebilir.

3.3 Gelişmiş hareketli koni yönteminin adımları

Açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması için uygulanacak yöntemin adımları şu şekildedir;

- 1) Blokların ekonomik değerleri hesaplanır.
- 2) Pozitif hareketli koni taban genişliği değeri standart olarak 1 kabul edilir.
- 3) Pozitif hareketli koni ile her bir blokta analiz yapılır.
- 4) Negatif koni ile blok kümesi optimizasyonu yapılır.
- 5) Yıllık üretim kapasitesi sınırı kısıt olarak eklenir.
- 6) *TBN*, *TBEV*, *BEVPB* değerleri hesaplanır.
- 7) Şartları sağlayan blok kümeleri arasından maksimum *BEVPB* değeri veren blok kümesi seçilir.
- 8) Maksimum *BEVPB* değeri; pozitif ise 9. madde uygulanır, negatif veya sıfır ise 10. maddeye geçilir.
- 9) Blok veya blok kümesi sistemden çıkarılır ve 2. maddeye geri dönlür.
- 10) Yıllık üretim kapasitesi sınırı kaldırılır (5. madde kısıtı) ve koni tabanı genişletilir ardından 3, 4, 6 ve 7. maddeler uygulanır.
- 11) Maksimum *BEVPB* değeri; pozitif ise 9. madde uygulanır, negatif veya sıfır ise 12. maddeye geçilir.
- 12) Açık ocak nihai sınırları elde edilir.
- 13) Yıllık üretim miktarına göre blok kümeleri gruplandırılır.
- 14) Algoritma sonlandırılır.

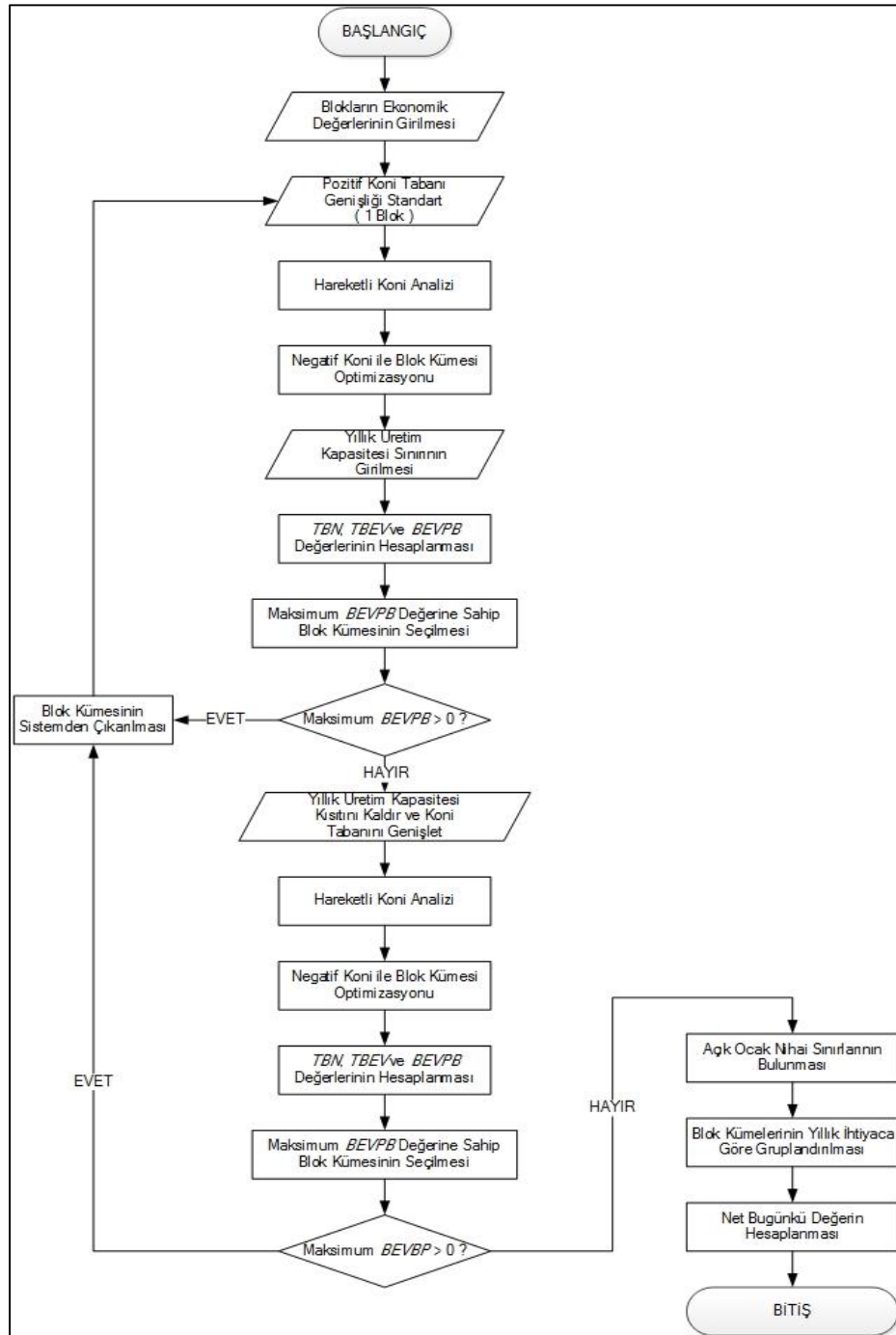
Burada;

BEVPB : Blok başına düşen ekonomik değer, (TL/blok)

TBEV : Toplam ekonomik değer, (TL)

TBN : Toplam blok sayısı

Yöntemin akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 : Yöntemin akış şeması.

3.4 Yöntemin Bir Örnek Üzerinde Uygulanması

Yöntemin genel hatlarıyla nasıl uygulanacağını gösteren akış şeması bir önceki şekilde verilmiştir (Şekil 3.18). Ayrıca yöntemin anlatılabilmesi için 2B bir blok model örneği üzerinde uygulama yapılması faydalı olacaktır.

3.4.1 Blok ekonomik değerlerinin (BEV) girilmesi

Yöntemin anlatılmasında kolaylık sağlaması açısından aşağıdaki örneğin adım adım çözülmesi düşünülmüştür (Şekil 3.19). Problemi çözebilmek amacıyla Microsoft Excel yazılımından faydalanılmıştır. 2B bir blok model kesitini temsil eden örnek, 5 satır ve 12 sütun olmak üzere toplam 60 bloktan oluşmaktadır. Bloklara içerdiği cevher miktarlarına göre ekonomik değerler (BEV) atanmıştır. Blok ekonomik değerleri -2 ile +4 TL arasında değişmektedir. Blok yükseklikleri ve genişliklerinin eşit olduğu ve şev açısının 45° olduğu varsayılmaktadır.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1

Şekil 3.19 : Örnek blok model ekonomik değerleri (BEV).

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-3	-4	0	4	5	5	2	6	0	5	1	1
	3	-7	-4	4	9	9	8	10	7	11	3	2	-2
	4	-8	1	8	14	12	14	16	18	13	6	-2	-1
	5	-3	3	13	11	18	21	21	20	16	5	0	-4

Şekil 3.20 : Her bir bloğun oluşturduğu blok kümesinin toplam değeri (TBEV).

Her bir bloğa, oluşturduğu blok kümesinin toplam ekonomik değerlerinin (*TBEV*) hesaplanarak kaydedildiği kesit görünüm şeklinde verilmiştir (Şekil 3.20). Bu şekilde görüldüğü gibi pozitif değere sahip birçok blok kümesi bulunmaktadır. Ocak nihai sınırlarının ve optimum kazı sıralamasının bulunması bu blok kümeleri arasından her adımda en uygun blok kümesi seçiminin yapılmasıyla oluşacaktır.

3.4.2 Birim kazı başına düşen ekonomik değerin (*BEVPB*) hesaplanması

Üretim sıralaması için önemli olan parametre, daha önceden de belirtildiği gibi birim blok kazısı başına düşen ekonomik değerdir. Bu nedenle toplam ekonomik değerlerden ziyade birim blok kazısı için ne kadar kazanç elde edildiği bulunmalıdır.

BEV	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
		-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
		-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
		-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
		-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
		-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1
TBEV	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
		-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
		-3	-4	0	4	5	5	2	6	0	5	1	1
		-7	-4	4	9	9	8	10	7	11	3	2	-2
		-8	1	8	14	12	14	16	18	13	6	-2	-1
		-3	3	13	11	18	21	21	20	16	5	0	-4
TBN	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
		6	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8	6
		10	13	15	16	16	16	16	16	16	15	13	10
		15	19	22	24	25	25	25	25	24	22	19	15

Şekil 3.21 : Blok kümelerindeki toplam blok sayıları (TBN).

Birim blok kazısıyla ne kadar kazanç elde edilebileceğini bulmak için öncelikle her bir blok kümesinde kazılması gerekli olan kaç blok bulunduğu (*TBN*) hesaplanmalıdır (Şekil 3.21). Ardından da *BEVPB* değerleri, diğer bir deyişle birim kazı için elde edilen ekonomik değerler hesaplanır (Şekil 3.22). Bu değerler hesaplanırken daha önceki bölümde (Bölüm 3.2.3) verilen $BEVPB = TBEV/TBN$ eşitliği kullanılır (Eşitlik(2.45)).

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-3	-4	0	4	5	5	2	6	0	5	1	1
	3	-7	-4	4	9	9	8	10	7	11	3	2	-2
	4	-8	1	8	14	12	14	16	18	13	6	-2	-1
	5	-3	3	13	11	18	21	21	20	16	5	0	-4
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
	3	6	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8	6
	4	10	13	15	16	16	16	16	16	16	15	13	10
	5	15	19	22	24	25	25	25	25	24	22	19	15
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	2,00	-1,00	2,00	2,00	-1,00	1,00	1,00	1,00
	2	-1,00	-1,00	0,00	1,00	1,25	1,25	0,50	1,50	0,00	1,25	0,25	0,33
	3	-1,17	-0,50	0,44	1,00	1,00	0,89	1,11	0,78	1,22	0,33	0,25	-0,33
	4	-0,80	0,08	0,53	0,88	0,75	0,88	1,00	1,13	0,81	0,40	-0,15	-0,10
	5	-0,20	0,16	0,59	0,46	0,72	0,84	0,84	0,80	0,67	0,23	0,00	-0,27

Şekil 3.22 : Birim kazı başına düşen ekonomik değerler (BEVPB).

Elde edilen şekil incelendiğinde (Şekil 3.22) herhangi bir blok ile ilgili bilgiler görülebilmektedir. Örneğin; 5F bloğu kazıldığı zaman kendisiyle beraber 25 blok kazıldığını ve elde edilen toplam değer 21 birim olduğunu ve böylece kazılan her blok başına düşen ekonomik değer $21/25 = 0,84$ TL/blok olduğunu görebiliriz.

Aynı şekil incelendiğinde (Şekil 3.22) ilk bakışta en yüksek ekonomik değeri (21 TL) veren 5F veya 5G bloğunun oluşturduğu blok kümesi alınmak istenebilirdi. Bu blok kümelerinin birim kazı başına düşen ekonomik değerleri (BEVPB) incelendiğinde 0,84 TL/blok olduğu görülür. Ancak bu blok kümeleri yerine 1E, 1G veya 1H blok seçeneklerinden biri kazılırsa blok başına düşen ekonomik değerin 2 TL/blok olduğu görülür. Bu seçenekleri kazı sıralaması için göz önünde bulundurmamak, paranın zaman değeri düşünülmediğinde net bugünkü değeri arttırabilme konusunda fayda sağlayacaktır. Öyleyse, BEVPB değerlerine dikkat edilerek kazı sıralaması yapılmalıdır. Yapılacak olan kazı sıralaması ilerleyen bölümlerde adım adım anlatılacaktır.

3.4.3 Blok kümesi optimizasyonu

Şekilde görülen (Şekil 3.22) *BEVPB* değerlerine bakıldığında bu değerlerin en yüksek olanının alınması gerektiği düşünülebilir. Ancak daha önceden belirtilen koni optimizasyonu işlemi (Bölüm 3.2.5) yapılmadan en yüksek değerin belirlenmemesi gerekir. Bunun için öncelikle blok kümeleri optimize edilip ardından optimize edilmiş bu blok kümeleri arasından en yüksek *BEVPB* içerikli blok kümesinin kazılması gerekir. Örnek problemin çözümü süresince optimize edilmiş blok değerleri incelenecek ve bu blok kümeleri arasından yıllık üretim miktarına uygun olan en yüksek *BEVPB* içerikli blok kümesi seçilecektir.

3.4.4 Yıllık üretim kapasitesi kısıtının hesaba katılması

Optimize edilmiş blok kümeleri arasından en yüksek *BEVPB* değerli blok kümesinin alınması her zaman o döneme ait nitelikli blok kümelerinin bulunması konusunda başarılı olsa da yine burada başka bir kısıt koymamız gerekmektedir. Bu kısıt yıllık üretim kapasitesidir.

Yıllık üretim kapasitesi kısıtı ocak nihai sınırlarının belirlenmesinde herhangi bir farklılık oluşturmayacaktır. Bu kısıtın hesaba katılması veya katılmaması ocak nihai sınırlarını değiştirmeyecektir.

Yıllık üretim kapasitesi kısıtı, optimize edilmiş blok kümelerinin istenilenden fazla bloklar içermesini engeller. Bu örnek için, cevher + dekapaj yıllık üretim kapasitesi 5 blok olarak kabul edilmiştir. Yıllık üretim kapasitesinin sabitlenmek istenmesinden dolayı yıllık cevher miktarında yıllara göre değişiklik olacağı unutulmamalıdır.

Bu yöntem kullanılırken istenildiği takdirde yıllık cevher miktarına bağlı olarak da üretim yapılabilir. Bu durumda dekapaj miktarı ve yıllık toplam üretim (cevher + dekapaj) değişken olacaktır.

Kazı kapasitesi (cevher + dekapaj) yıllık 5 blok olarak seçildiği için blok model üzerinde bu kısıtın tanımlanması gereklidir. Böylelikle; optimize edilmiş olan blok kümeleri içerisinde en yüksek *BEVPB* değerli blok kümesi aranırken 5 bloktan fazla sayıda blok içeren kümeler ihmal edilir. Bu kısıt konulmadığı takdirde, bir dönemde kazabileceğimiz blok sayısından çok daha fazla blok içeren blok kümeleri önerilebilir. Bu da yıllık üretim miktarlarında büyük oynamalara yol açar.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
	2	-3	-4	0	4	5	5	2	6	0	5	1	1
	3	-7	-4	4	9	9	8	10	7	11	3	2	-2
	4	-8	1	8	14	12	14	16	18	13	6	-2	-1
	5	-3	3	13	11	18	21	21	20	16	5	0	-4
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
	3	6	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8	6
	4	10	13	15	16	16	16	16	16	16	15	13	10
	5	15	19	22	24	25	25	25	25	24	22	19	15
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	2,00	-1,00	2,00	2,00	-1,00	1,00	1,00	1,00
	2	-1,00	-1,00	0,00	1,00	1,25	1,25	0,50	1,50	0,00	1,25	0,25	0,33
	3	-1,17	-0,50	0,44	1,00	1,00	0,89	1,11	0,78	1,22	0,33	0,25	-0,33
	4	-0,80	0,08	0,53	0,88	0,75	0,88	1,00	1,13	0,81	0,40	-0,15	-0,10
	5	-0,20	0,16	0,59	0,46	0,72	0,84	0,84	0,80	0,67	0,23	0,00	-0,27
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5													

Şekil 3.23 : Yıllık üretim kapasitesinin entegre edilmesi.

Yıllık maksimum üretim kapasitesinin 5 blok kabul edilmesinden dolayı şeklin alt kısmına hatırlatma amacıyla yazılmıştır (Şekil 3.23).

Yıllık üretim kapasitesinden daha düşük olan blok kümelerinin kazı sıralamasında seçilmesi durumunda bu blok kümeleri kazı sıralaması sonunda birleştirilir ve yıllık hedefe mümkün olduğunca yakın gruplar haline getirilir. Eğer cevher üretim miktarı yıllık bazda sabitlenmek istenirse cevher üretim miktarlarına bakılarak gruplandırma yapılır.

Bütün bu tanımlamalar göz önünde bulundurulduğunda örnek kesit üzerinde uygulamaya başlamadan önceki durum şekildeki gibidir (Şekil 3.24). Bu şekilde görülen sağ taraftaki tabloda her adımda hangi blokların alındığı (*Blok No*), alınan toplam blok sayısı (*TBN*), blokların toplam ekonomik değerleri (*TBEV*) ve birim kazı başına düşen ekonomik değer (*BEVPB*) gösterilecektir.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB	
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1						
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1						1
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2						2
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1						3
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1						4
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L						
	1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1	6					
	2	-3	-4	0	4	5	5	2	6	0	5	1	1	7					
	3	-7	-4	4	9	9	8	10	7	11	3	2	-2	8					
	4	-8	1	8	14	12	14	16	18	13	6	-2	-1	9					
	5	-3	3	13	11	18	21	21	20	16	5	0	-4	10					
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L						
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11					
	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	12					
	3	6	8	9	9	9	9	9	9	9	9	8	6	14					
	4	10	13	15	16	16	16	16	16	16	15	13	10	15					
	5	15	19	22	24	25	25	25	25	24	22	19	15	16					
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L						
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	2,00	-1,00	2,00	2,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	17					
	2	-1,00	-1,00	0,00	1,00	1,25	1,25	0,50	1,50	0,00	1,25	0,25	0,33	18					
	3	-1,17	-0,50	0,44	1,00	1,00	0,89	1,11	0,78	1,22	0,33	0,25	-0,33	19					
	4	-0,80	0,08	0,53	0,88	0,75	0,88	1,00	1,13	0,81	0,40	-0,15	-0,10	20					
	5	-0,20	0,16	0,59	0,46	0,72	0,84	0,84	0,80	0,67	0,23	0,00	-0,27	21					
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	0	0	0,00	

Şekil 3.24 : Örnek uygulama başlangıç durumu.

3.4.5 Örnek problemin çözümüne başlangıç

Birinci adımda; şekle (Şekil 3.24) göz atılacak olursa birim kazı başına düşen ekonomik değeri (BEVPB) en yüksek olan seçenekler 1E, 1G veya 1H'dir. Birden fazla öneri var olduğu için belli bir düzeni takip etmek adına en soldaki 1E bloğunu seçebiliriz. Ocak çıkış konumu belirlenmiş olsaydı bu konuma en yakın bloğun alınması gibi bir yol izlenebilirdi. Bu örnek için böyle durumlarla karşılaşıldığında her zaman en üstteki ve soldaki blok alınacaktır. 1E bloğunun alınmasıyla oluşan şekil aşağıda verilmiştir (Şekil 3.25). Bu şekilde görüldüğü gibi hesaplamalar güncellenmiş ve yeni değerler elde edilmiştir. Alınan bloğun içeriği ve özellikleri sağ tarafta yer alan tabloya yazılmıştır.

Daha önceki bölümlerde blok kümesi optimizasyonundan bahsedilmiştir. Burada +2 değerlikli blokların seçilmesi esnasında diğer blok kümelerinin optimize edilmemiş değerlerine değil, optimize edilmiş değerlerine bakılarak +2 değerlikli bloklar seçilmiştir. Diğer bir deyişle bu iterasyonda, optimize edilmiş blok kümeleri de dâhil olmak üzere blok başına düşen ekonomik kazancı +2 TL'den fazla olan başka bir blok kümesi yoktur. Tüm iterasyonlarda pozitif koni ile elde edilmiş BEVPB değerleri değil, negatif koni ile optimizasyon işleminden geçirilmiş BEVPB değerleri karşılaştırılmalıdır.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
BEV	1	-1	-1	-1	1		-1	2	2	-1	1	1	1		1E	1	2	2,00
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1	1				
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2	2				
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	3				
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	4				
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5				
	1	-1	-1	-1	1		-1	2	2	-1	1	1	1	6				
	2	-3	-4	0	2	3	3	2	6	0	5	1	1	7				
	3	-7	-4	2	7	7	6	8	7	11	3	2	-2	8				
	4	-8	-1	6	12	10	12	14	16	13	6	-2	-1	9				
	5	-5	1	11	9	16	19	19	18	14	5	0	-4	10				
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11				
	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	12				
	2	3	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	3	13				
	3	6	8	8	8	8	8	8	9	9	9	8	6	14				
	4	10	12	14	15	15	15	15	15	16	15	13	10	15				
	5	14	18	21	23	24	24	24	24	23	22	19	15	16				
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17				
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	####	-1,00	2,00	2,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	18				
	2	-1,00	-1,00	0,00	0,67	1,00	1,00	0,50	1,50	0,00	1,25	0,25	0,33	19				
	3	-1,17	-0,50	0,25	0,88	0,88	0,75	1,00	0,78	1,22	0,33	0,25	-0,33	20				
	4	-0,80	-0,08	0,43	0,80	0,67	0,80	0,93	1,07	0,81	0,40	-0,15	-0,10	21				
	5	-0,36	0,06	0,52	0,39	0,67	0,79	0,79	0,75	0,61	0,23	0,00	-0,27	22				
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	1	2	2,00

İlk iterasyonda blok kümesi seçeneklerinden 1E'nin alınmasıyla hesaplamalar tekrar yapılır. Yeni hesaplamalara göre BEVPB değerleri yüksek iki seçenek olan 1G ve 1H blok kümeleri bulunmaktadır. Soldaki blok 1G'nin alınmasıyla iterasyonlara devam edilir (Şekil 3.26).

Üçüncü adım sonunda elde edilen *BEVPB* değerlerinden maksimum olanına (1,25 TL/blok) bakıldığında 2J bloğunun oluşturduğu koninin alınması gerektiği düşünülebilir. Ancak daha önceden de bahsedildiği gibi buradaki *BEVPB* değerleri değil optimizasyondan geçmiş blok kümelerinin *BEVPB* değerlerine bakılmalıdır. Optimize edilmiş konilerden elde edilen *BEVPB* değerleri burada gösterilememiştir ancak bu özellik programlanabilir olduğu için yazılımda daha verimli olarak kullanılacaktır.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB					
	1	-1	-1	-1	1		-1		2	-1	1	1	1										
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1						1	1E	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2						2	1G	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1						3				
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1						4				
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	-1	-1	-1	1		-1		2	-1	1	1	1	6									
	2	-3	-4	0	2	3		0	4	0	5	1	1	7									
	3	-7	-4	2	7	5	4	6	5	9	3	2	-2	8									
	4	-8	-1	6	10	8	10	12	14	11	4	-2	-1	9									
	5	-5	1	9	7	14	17	17	16	12	3	-2	-4	10									
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	11									
	2	3	4	4	3	3	2	3	3	4	4	4	3	12									
	3	6	8	8	8	7	7	7	8	8	9	8	6	13									
	4	10	12	14	14	14	14	14	14	15	14	13	10	14									
	5	14	18	20	22	23	23	23	23	22	21	18	15	15									
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	####	-1,00	####	2,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	17									
	2	-1,00	-1,00	0,00	0,67	1,00	0,50	0,00	1,33	0,00	1,25	0,25	0,33	18									
	3	-1,17	-0,50	0,25	0,88	0,71	0,57	0,86	0,63	1,13	0,33	0,25	-0,33	19									
	4	-0,80	-0,08	0,43	0,71	0,57	0,71	0,86	1,00	0,73	0,29	-0,15	-0,10	20									
	5	-0,36	0,06	0,45	0,32	0,61	0,74	0,74	0,70	0,55	0,14	-0,11	-0,27	21									
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	2	4	2,00					

Şekil 3.26 : Örnek uygulama 2.adım.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB					
	1	-1	-1	-1	1		-1			-1	1	1	1										
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1						1	1E	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2						2	1G	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1						3	1H	1	2	2,00
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1						4				
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	-1	-1	-1	1		-1			-1	1	1	1	6									
	2	-3	-4	0	2	3	1	-2	2	-2	5	1	1	7									
	3	-7	-4	2	7	5	2	4	3	7	1	2	-2	8									
	4	-8	-1	6	10	6	8	10	12	9	2	-4	-1	9									
	5	-5	1	9	5	12	15	15	14	10	1	-4	-6	10									
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	11									
	2	3	4	4	3	3	2	2	2	3	4	4	3	12									
	3	6	8	8	8	7	6	6	7	7	8	8	6	13									
	4	10	12	14	14	13	13	13	13	14	13	12	10	14									
	5	14	18	20	21	22	22	22	22	21	20	17	14	15									
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L										
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	####	-1,00	####	####	-1,00	1,00	1,00	1,00	17									
	2	-1,00	-1,00	0,00	0,67	1,00	0,50	-1,00	1,00	-0,67	1,25	0,25	0,33	18									
	3	-1,17	-0,50	0,25	0,88	0,71	0,33	0,67	0,43	1,00	0,13	0,25	-0,33	19									
	4	-0,80	-0,08	0,43	0,71	0,46	0,62	0,77	0,92	0,64	0,15	-0,33	-0,10	20									
	5	-0,36	0,06	0,45	0,24	0,55	0,68	0,68	0,64	0,48	0,05	-0,24	-0,43	21									
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	3	6	2,00					

Şekil 3.27 : Örnek uygulama 3.adım.

2J bloğunun oluşturduğu blok kümesinden daha avantajlı olan blok kümesi ise 3I blok kümesinin optimize edilmiş halidir (Şekil 3.28). Bu blok kümesinin optimizasyonu ile elde edilen blok kümesinde toplam ekonomik değeri düşüren 3I ve 2I blokları yer almaz. Sadece 1I, 1J, 1K, 2H ve 2J blokları alınır. Bu bloklar toplamda +8TL

ekonomik değerine sahiptir ve *BEVPB* değeri $(-1+1+1+3+4)/5 = 1,6$ TL/blok olarak bulunmuştur.

	G	H	I	J	K	
1			-1	1	1	3I Konisi = +7
2		3	-2	4		
3			1			
	G	H	I	J	K	
1			-1	1	1	Optimize edilmiş 3I Konisi = +8
2		3		4		
3						

Şekil 3.28 : 3I blok kümesinin optimizasyonu.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
BEV	1	-1	-1	1		-1						1	1	1E	1	2	2,00
	2	-1	-1	1	2	3	2	-1		-2		-1	2	1G	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	2	4	1	-1	-1	-2	3	1H	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	4	1I, 1J, 1K, 2H, 2J	5	8	1,60
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-1	5				
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	6			
	1	-1	-1	-1	1		-1						1	7			
	2	-3	-4	0	2	3	1	-2		-2		-1	0	8			
	3	-7	-4	2	7	5	2	2	0	-1	-4	-3	-4	9			
	4	-8	-1	6	10	6	6	7	4	1	-6	-9	-6	10			
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11			
	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	12			
	2	3	4	4	3	3	2	0	0	1	0	2	2	13			
	3	6	8	8	8	7	6	4	4	2	4	4	4	14			
	4	10	12	14	14	13	11	10	8	9	8	8	6	15			
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17			
	1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	####	-1,00	####	####	####	####	####	1,00	18			
	2	-1,00	-1,00	0,00	0,67	1,00	0,50	-1,00	####	-2,00	####	-0,50	0,00	19			
	3	-1,17	-0,50	0,25	0,88	0,71	0,33	0,50	0,00	-0,50	-1,00	-0,75	-1,00	20			
	4	-0,80	-0,08	0,43	0,71	0,46	0,55	0,70	0,50	0,11	-0,75	-1,13	-1,00	21			
	5	-0,36	0,06	0,45	0,24	0,50	0,63	0,41	0,35	0,13	-0,47	-1,00	-1,10	22			
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5														Toplam	8	14	1,75

Şekil 3.29 : Örnek uygulama 4.adım.

Bahsi geçen 3I blok kümesi negatif koni ile optimize edilmemiş olsaydı toplam ekonomik değeri +7TL, *BEVPB* değeri ise $(-1+1+1+3-2+4+1)/7 = 7$ TL/blok olacaktı. Bu blok kümesinin sistemden çıkarılmasıyla elde edilen şekil aşağıda verilmiştir (Şekil 3.29). Koni optimizasyonu konusu için 3.2.5 no'lu bölüme bakılabilir.

Optimizasyonu sağlanmış olan 3I blok kümesinin sistemden çıkarılmasıyla bütün hesaplamalar yenilenir. Yeni hedef blok kümesi belirlenir. Burada en yüksek *BEVPB* değeri veren blok kümesi 3F konisinin oluşturduğu blok kümesinin optimize edilmiş halidir (Şekil 3.30). Bu blok kümesinin çıkarılması ile hesaplamalar yeniden yapılır ve problemin çözümüne devam edilir (Şekil 3.31).

	D	E	F	G	H	
1	1		-1			3F Konisi = +2
2		3	2	-1		
3			-2			

	D	E	F	G	H	
1	1		-1			Optimize E dilmiş
2		3	2			3F Konisi = +5
3						

Şekil 3.30 : 3F blok kümesinin optimizasyonu.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
		1	-1	-1	-1													
BEV	2	-1	-1	1	2			-1		-2		-2	-1	1	1E	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2	2	1G	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	3	1H	1	2	2,00
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60
	6	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25
TBEV	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5				
	2	-1	-1	-1									1	6				
	3	-3	-4	-1	1			-1		-2		-1	0	7				
	4	-7	-5	1	4	0	-3	1	1	-1	-4	-3	-4	8				
	5	-9	-2	3	5	1	1	2	3	2	-6	-9	-6	9				
	6	-6	-2	4	0	5	7	2	1	1	-6	-12	-11	10				
TBN	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11				
	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12				
	3	3	4	3	2	0	0	1	0	1	0	2	2	13				
	4	6	7	7	5	3	2	2	3	2	4	4	4	14				
	5	9	11	11	10	9	7	6	6	8	8	8	6	15				
	6	13	15	16	17	16	15	13	13	14	14	12	10	16				
BEVPB	1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17				
	2	-1,00	-1,00	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	1,00	18				
	3	-1,00	-1,00	-0,33	0,50	####	####	-1,00	####	-2,00	####	-0,50	0,00	19				
	4	-1,17	-0,71	0,14	0,80	0,00	-1,50	0,50	0,33	-0,50	-1,00	-0,75	1,00	20				
	5	-1,00	-0,18	0,27	0,50	0,11	0,14	0,33	0,50	0,25	-0,75	-1,13	-1,00	21				
	6	-0,46	-0,13	0,25	0,00	0,31	0,47	0,15	0,08	0,07	-0,43	-1,00	-1,10	22				
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	12	19	1,58

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
BEV	1	-1	-1	-1									1	1E	1	2	2,00
	2	-1	-1	1	2			-1		-2		-2	2	1G	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	3	1H	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25
TBEV	1	-1	-1	-1									6	1L	1	1	1,00
	2	-3	-4	-1	1			-1		-2		-2	7				
	3	-7	-5	1	4	0	-3	1	1	-1	-5	-4	8				
	4	-9	-2	3	5	1	1	2	3	1	-7	-10	9				
	5	-6	-2	4	0	5	7	2	0	0	-7	-13	10				
TBN	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11				
	2	3	4	3	2	0	0	1	0	1	0	1	12				
	3	6	7	7	5	3	2	2	3	2	3	3	13				
	4	9	11	11	10	9	7	6	6	7	7	7	14				
	5	13	15	16	17	16	15	13	12	13	13	11	15				
BEVPB	1	-1,00	-1,00	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	16				
	2	-1,00	-1,00	-0,33	0,50	####	####	-1,00	####	-2,00	####	-2,00	17				
	3	-1,17	-0,71	0,14	0,80	0,00	-1,50	0,50	0,33	-0,50	-1,67	-1,33	18				
	4	-1,00	-0,18	0,27	0,50	0,11	0,14	0,33	0,50	0,14	-1,00	-1,43	19				
	5	-0,46	-0,13	0,25	0,00	0,31	0,47	0,15	0,00	0,00	-0,54	-1,18	20				
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5													21	Toplam	13	20	1,54

Şekil 3.32 : Örnek uygulama 6.adım.

	F	G	H	I	J	
1						4H Konisi = +3
2		-1		-2		
3		2	4	1		
4			-1			
	F	G	H	I	J	
1						Optimize E dilmiş 4H Konisi = +4
2		-1		-2		
3		2	4	1		
4						

Şekil 3.33 : 4H blok kümesinin optimizasyonu.

Bir sonraki adımda 1B, 1C, 2C, 2D ve 3D'den oluşan blok kümesi sistemden çıkarılır (Şekil 3.35). Bu blok kümesi optimize edilmeye gerek duymadan en yüksek BEVPB değerini vermektedir. Çıkarılan blok kümesinin özellikleri tabloya not edilir.

Problemin çözümü için 9. Adıma gelindiğinde 4D konisinin oluşturduğu blok kümesi optimize edilmeye gerek duyulmadan sistemden çıkarılır (Şekil 3.36).

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB					
	1	-1	-1	-1																			
	2	-1	-1	1	2							-2	-1						1	1E	1	2	2,00
	3	-2	-1	2	3	-1	-2				-1	-1	-2						2	1G	1	2	2,00
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1						3	1H	1	2	2,00
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1						4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25					
	1	-1	-1	-1										6	1L	1	1	1,00					
	2	-3	-4	-1	1							-2	-1	7	2G,2I,3G,3H,3I	5	4	0,80					
	3	-7	-5	1	4	0	-2				-3	-4	-5	8									
	4	-9	-2	3	5	2	0	-1	-1	-1	-6	-8	-7	9									
	5	-6	-2	4	1	4	4	-2	-4	-4	-9	-12	-10	10									
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11									
	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12									
	2	3	4	3	2	0	0	0	0	0	0	1	1	13									
	3	6	7	7	5	3	1	0	0	0	2	3	3	14									
	4	9	11	11	10	8	5	2	1	3	5	6	5	15									
	5	13	15	16	16	14	11	8	7	8	9	9	8	16									
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17									
	1	-1,00	-1,00	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	####	18									
	2	-1,00	-1,00	-0,33	0,50	####	####	####	####	####	####	-2,00	-1,00	19									
	3	-1,17	-0,71	0,14	0,80	0,00	-2,00	####	####	####	-1,50	-1,33	-1,67	20									
	4	-1,00	-0,18	0,27	0,50	0,25	0,00	-0,50	-1,00	-0,33	-1,20	-1,33	-1,40	21									
	5	-0,46	-0,13	0,25	0,06	0,29	0,36	-0,25	-0,57	-0,50	-1,00	-1,33	-1,25	22									
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	18	24	1,33					

Şekil 3.34 : Örnek uygulama 7.adım.

BEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB						
	1	-1																	1	1E	1	2	2,00	
	2	-1	-1										-2						-1	2	1G	1	2	2,00
	3	-2	-1	2		-1	-2				-1	-1	-2						3	1H	1	2	2,00	
	4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1						4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60	
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1						5	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60	
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25						
	1	-1												6	1L	1	1	1,00						
	2	-2	-2										-2	-1	7	2G,2I,3G,3H,3I	5	4	0,80					
	3	-5	-4	0		-1	-2				-3	-4	-5	8	1B,1C,2C,2D,3D	5	4	0,80						
	4	-8	-3	-1	1	-2	-1	-1	-1	-1	-6	-8	-7	9										
	5	-7	-6	0	-3	0	0	-3	-4	-4	-9	-12	-10	10										
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11										
	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12										
	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	13										
	3	4	4	3	0	1	1	0	0	0	2	3	3	14										
	4	6	7	6	5	3	3	2	1	3	5	6	5	15										
	5	9	10	11	11	9	6	6	7	8	9	9	8	16										
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17										
	1	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	18										
	2	-1,00	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	-2,00	-1,00	19										
	3	-1,25	-1,00	0,00	####	-1,00	-2,00	####	####	####	-1,50	-1,33	-1,67	20										
	4	-1,33	-0,43	-0,17	0,20	-0,67	-0,33	-0,50	-1,00	-0,33	-1,20	-1,33	-1,40	21										
	5	-0,78	-0,60	0,00	-0,27	0,00	0,00	-0,50	-0,57	-0,50	-1,00	-1,33	-1,25	22										
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	23	28	1,22						

Şekil 3.35 : Örnek uygulama 8.adım.

	BEV	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
	1																	
	2	-1										-2	-1	1	1E	1	2	2,00
	3	-2	-1				-2				-1	-1	-2	2	1G	1	2	2,00
	4	-2	1	1		1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	3	1H	1	2	2,00
	5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60
TBEV		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25
	1													6	1L	1	1	1,00
	2	-1										-2	-1	7	2G,2I,3G,3H,3I	5	4	0,80
	3	-3	-2				-2				-3	-4	-5	8	1B,1C,2C,2D,3D	5	4	0,80
	4	-6	-3	-1		-1	0	-1	-1	-1	-6	-8	-7	9	1A,2B,3C,3E,4D	5	1	0,20
	5	-7	-6	-1	-4	-1	1	-2	-4	-4	-9	-12	-10	10				
TBN		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11				
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12				
	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	13				
	3	2	2	0	0	0	1	0	0	0	2	3	3	14				
	4	4	4	3	0	2	2	2	1	3	5	6	5	15				
	5	6	7	6	6	4	5	5	7	8	9	9	8	16				
BEVPB		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17				
	1	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	####	18				
	2	-1,00	####	####	####	####	####	####	####	####	####	-2,00	-1,00	19				
	3	-1,50	-1,00	####	####	####	-2,00	####	####	####	-1,50	-1,33	-1,67	20				
	4	-1,50	-0,75	-0,33	####	####	-0,50	0,00	-0,50	-1,00	-0,33	-1,20	-1,33	21				
	5	-1,17	-0,86	-0,17	-0,67	-0,25	0,20	-0,40	-0,57	-0,50	-1,00	-1,33	-1,25	22				
Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5															Toplam	28	29	1,04

Bir sonraki aşamada inceleme yapıldığında 5F blok kümesinin toplam ekonomik değerinin +1 TL iken optimize edildikten sonra +2 TL'ye yükseldiği görülmektedir (Şekil 3.37). Bu blok kümesi de sistemden çıkarılır ve gerekli değerler yeniden hesaplanır (Şekil 3.38).

Şekil 3.37 : 5F blok kümesinin optimizasyonu.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
BEV																	
	-1										-2	-1	1	1E	1	2	2,00
	-2	-1								-1	-1	-2	2	1G	1	2	2,00
	-2	1	1					-1	2	-1	-1	-1	3	1H	1	2	2,00
	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1,60
TBEV	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	5	1D,1F,2E,2F	4	5	1,25
													6	1L	1	1	1,00
	-1										-2	-1	7	2G,2I,3G,3H,3I	5	4	0,80
	-3	-2								-3	-4	-5	8	1B,1C,2C,2D,3D	5	4	0,80
	-6	-3	-1					-1	-1	-6	-8	-7	9	1A,2B,3C,3E,4D	5	1	0,20
TBN	-7	-6	-1	-3	-2	-1	-3	-3	-4	-9	-12	-10	10	3F,4E,4F,4G	4	2	0,50
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	11				
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12				
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	13				
	2	2	0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	14				
BEVPB	4	4	3	0	0	0	0	1	3	5	6	5	15				
	6	7	6	4	1	1	2	5	8	9	9	8	16				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	17				
	###	###	###	###	###	###	###	###	###	###	###	###	18				
	-1,00	###	###	###	###	###	###	###	###	###	-2,00	-1,00	19				
BEVPB	-1,50	-1,00	###	###	###	###	###	###	###	-1,50	-1,33	-1,67	20				
	-1,50	-0,75	-0,33	###	###	###	###	-1,00	-0,33	-1,20	-1,33	-1,40	21				
	-1,17	-0,86	-0,17	-0,75	-2,00	-1,00	-1,50	-0,60	-0,50	-1,00	-1,33	-1,25	22				
	Yıllık üretim kapasitesi (maksimum blok sayısı) ≤ 5													Toplam	32	31	0,97

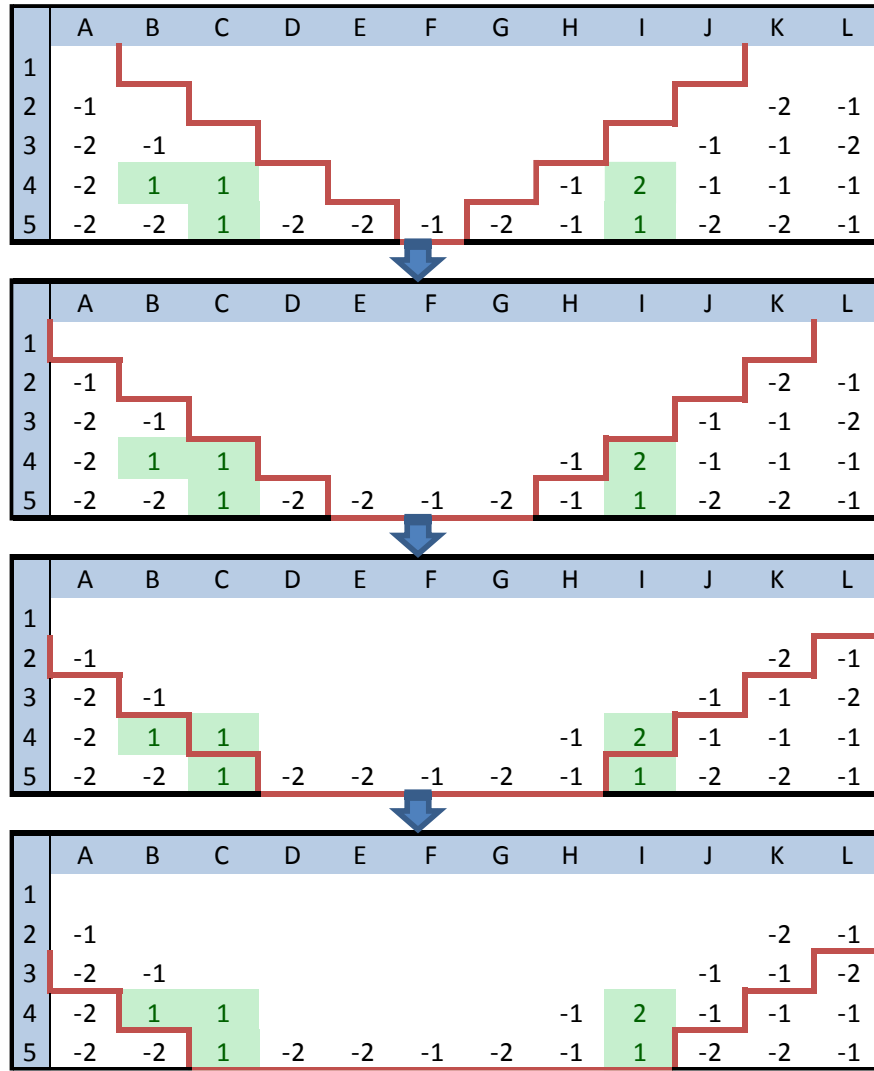
Şekil 3.38 : Örnek uygulama 10.adım.

Örnek model üzerinde 10. adımdan sonra elde edilen optimize edilmiş *BEVPB* değerlerinde pozitif değerli blok kümesi kalmadığı için bu aşamada son bir kontrol işlemi yapmak gereklidir. Bu işlemin yapılmasının sebebi Bölüm 3.2.6 ‘da açıklanmıştır.

3.4.6 Arama konisinin tabanının genişletilmesi ve iterasyonların sonu

Bu optimizasyon işleminde, hareketli koninin tabanında yer alan tek blok genişliği, blok modelin toplam genişliği kadar artırılır. Yıllık üretim kapasitesi kısıtı da bu aşamada geçici süreliğine kaldırılmalıdır (Şekil 3.39).

Bu işlem hareketli koni yönteminin dezavantajlarından kurtulması için gereklidir. Bu işlemin yapılmasının sebebi, blok modelin tabanında yer alan blokların analizinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesidir. Örneğin; optimize edildiğinde tabanı 5J ve 5K bloklarından oluşan pozitif içerikli bir blok kümesinin genişletilmemiş tabana sahip bir hareketli koni tarafından bulunması imkânsızdır. Bunun nedeni koni tabanının (uç kısmının) inebileceği derinliğin en fazla 5. satır olmasıdır. Koni tabanının genişletilmesi ile hareketli koni sanki 5. satırdan daha aşağıdaki bloklar üzerinde arama yapıyormuş gibi davranır.



Şekil 3.39 : Koni tabanının genişletilmesi.

Bu işlem sonucunda; alınabilecek pozitif değerli blok kümesi varsa alınır. Ardından yıllık üretim kapasitesi kısıtı ve koni eski haline getirilip tekrar aramalara başlanır. Eğer koni tabanının genişletilmesiyle de herhangi bir pozitif değerli blok kümesi bulunamıyorsa algoritma sonlandırılır.

3.4.7 Açık ocak nihai sınırlarının tespiti

Yapılan incelemeler sonucunda kazılacak blok kalmadığı için gelinmiş olan nokta açık ocak nihai sınırları olarak kabul edilebilir (Şekil 3.40). Kazısı yapılan bloklar toplu halde verildiğinde (Çizelge 3.2) blok kümelerinin kazı sıralaması ve ocak nihai sınırları içerisinde kalan bloklar görülmektedir. Ocak nihai sınırlarına ulaşıldığında toplam 32 blok kazıldığı ve bu blokların toplam değerinin 31 TL olduğu görülmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2	-1										-2	-1
3	-2	-1								-1	-1	-2
4	-2	1	1					-1	2	-1	-1	-1
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1

Şekil 3.40 : Örnek problem için açık ocak nihai sınırları.

Çizelge 3.2 : Nihai sınırlar içerisinde kalan bloklar.

Adım	Blok No	TBN	TBEV	BEVPB
1	1E	1	2	2.00
2	1G	1	2	2.00
3	1H	1	2	2.00
4	1I,1J,1K,2H,2J	5	8	1.60
5	1D,1F,2E,2F	4	5	1.25
6	1L	1	1	1.00
7	2G,2I,3G,3H,3I	5	4	0.80
8	1B,1C,2C,2D,3D	5	4	0.80
9	1A,2B,3C,3E,4D	5	1	0.20
10	3F,4E,4F,4G	4	2	0.50
	Toplam	32	31	0.97

3.4.8 Yıllara göre kazı planlaması ve blokların gruplandırılması

Yıllık toplam (cevher + dekapaj) üretim kapasitesi kısıtı 5 blok kabul edildiğinden dolayı çözümün herhangi bir adımında bu 5 blokluk kısıtın aşılmadığı görülmektedir. Ancak bazı adımlarda 5 bloktan az ilerlemeler mevcuttur. Böyle durumlarda bu blok veya blok kümelerinin bir önceki veya bir sonraki blok kümesine eklenilmesi gerekir. Aşağıdaki şekilde yıllara göre gruplandırılmış olan blokların üretim sıralaması verilmiştir (Şekil 3.41). Bu durumda yıllık kazı planı aşağıda verilen tablodaki gibi olacaktır (Çizelge 3.3). Bu tabloda yıllık planda kazılması gereken cevher ve dekapaj blokları da ayrı olarak girilmiştir. Üretim planlamasında NBD'nin de önemli olmasından dolayı bu değerler hesaplanmış ve tabloya eklenmiştir. Bu tabloda yılsonu elde edilen kazançların %10 iskonto oranı ile net bugünkü değerleri görülmektedir. Toplamda 32 blok için 7 yıllık kazı planı yapılabilir. İlk yıl ve son yıl elde edilen kazı miktarı diğer yıllara göre düşüktür. Diğer yıllarda üretim miktarı yıllık 5 blok olarak gözükmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	-1	-1	-1	1		-1			-1	1	1	1	1. YIL
2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1	
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2	
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	-1	-1	-1	1		-1						1	2. YIL
2	-1	-1	1	2	3	2	-1		-2		-2	-1	
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2	
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	-1	-1	-1										3. YIL
2	-1	-1	1	2			-1		-2		-2	-1	
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2	
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	-1	-1	-1										4. YIL
2	-1	-1	1	2							-2	-1	
3	-2	-1	2	3	-1	-2				-1	-1	-2	
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	-1												5. YIL
2	-1	-1									-2	-1	
3	-2	-1	2		-1	-2				-1	-1	-2	
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1													6. YIL
2	-1										-2	-1	
3	-2	-1				-2				-1	-1	-2	
4	-2	1	1		1	2	1	-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1													7. YIL
2	-1										-2	-1	
3	-2	-1								-1	-1	-2	
4	-2	1	1					-1	2	-1	-1	-1	
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1	

Şekil 3.41 : Yıllara göre kazı planı.

Çizelge 3.3 : Yıllık üretim miktarına göre kazılacak bloklar ve NBD.

Üretim Yılı	Blok No	Blok Sayıları			Toplam Ekonomik Değer (TBEV), (TL)	Blok Kazısı Başına Düşen Ekonomik Değer (BEVPB), (TL/Blok)	Net Bugünkü Değer (NBD), (TL)
		Cevher	Dekapaj	Toplam			
1	1E,1G,1H	3	0	3	6	2.00	5.45
2	1I,1J,1K,2H,2J	4	1	5	8	1.60	6.61
3	1D,1F,2E,2F,1L	4	1	5	6	1.20	4.51
4	2G,2I,3G,3H,3I	3	2	5	4	0.80	2.73
5	1B,1C,2C,2D,3D	3	2	5	4	0.80	2.48
6	1A,2B,3C,3E,4D	2	3	5	1	0.20	0.56
7	3F,4E,4F,4G	3	1	4	2	0.50	1.03
	Toplam	22	10	32	31	0.97	23.38

3.4.9 Nihai sınır tespiti sonucunun yorumlanması

Bu örnek sonucunda, yöntemin ocak nihai sınırlarını tespit edebilirliği konusunda diğer yöntemlerle karşılaştırılması uygun görülmüştür. Bu amaçla LG algoritması, klasik hareketli koni yöntemi ve Korobov algoritması ile mevcut örneğin nihai sınırları bulunmuştur.

Farklı yöntemler kullanarak nihai sınırların tespit edilebilmesi için UPL (Drew ve Baafi, 2002) yazılımından faydalanılmıştır. Bu program Microsoft Excel içerisinde oluşturulmuş olan makro sayesinde nihai sınırları bulabilmektedir.

Şekilde de görüldüğü gibi LG Algoritması ile yapılan nihai sınır tespitinde toplam 32 blok alınmıştır (Şekil 3.42). Bu bloklardan 22 tanesi cevher bloğu 10 tanesi ise dekapaj bloğudur. Ocağın toplam değeri 31 birimdir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1

Şekil 3.42 : LG algoritması ile bulunan nihai sınırlar.

Hareketli koni yöntemi ile yapılan nihai sınır tespitinde ise toplam 28 blok alınmıştır (Şekil 3.43). Bu bloklardan 19 tanesi cevher bloğu ve 9 tanesi dekapaj bloğudur. Ocağın toplam değeri ise 29 birimdir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1

Şekil 3.43 : Hareketli koni yöntemi ile bulunan nihai sınırlar.

Korobov algoritması ile yapılan nihai sınır tespitinde ise toplam 35 blok alınmıştır (Şekil 3.44). Bu bloklardan 19 tanesi cevher bloğu ve 16 tanesi dekapaj bloğudur. Ocağın toplam değeri ise 30 birimdir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	2	-1	1	1	1
2	-1	-1	1	2	3	2	-1	3	-2	4	-2	-1
3	-2	-1	2	3	-1	-2	2	4	1	-1	-1	-2
4	-2	1	1	2	1	2	1	-1	2	-1	-1	-1
5	-2	-2	1	-2	-2	-1	-2	-1	1	-2	-2	-1

Şekil 3.44 : Korobov algoritması ile bulunan nihai sınırlar.

Yukarıda belirtilen üç farklı yönteme ait nihai sınırlar ve hareketli koni analizi ile daha önce belirlenmiş olan sınırların detayları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 : Örnek üzerinde farklı yöntemlerle bulunmuş nihai sınır sonuçları.

Yöntem	Alınan Blok Sayısı			Toplam Ocak Değeri
	Cevher	Dekapaj	Toplam	
LG Algoritması	22	10	32	31
Hareketli Koni Yöntemi	19	9	28	29
Korobov Algoritması	23	12	35	30
Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi (*)	22	10	32	31
* Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi terimi, bu çalışmada yer alan algoritmanın belirtilebilmesi amacıyla kullanılmıştır.				

Tabloda da görüldüğü gibi geliştirilen yöntem LG algoritmasının verdiği nihai sınırlar ile aynı sonucu vermiştir. LG algoritması, matematiksel olarak optimum sonucu veren yöntemlerden biri olduğu için bu yöntemin güvenilirliği konusunda fikir vermektedir.

3.5 Yöntemin 2B Bir Örnek Üzerinde Test Edilmesi

Geliştirilmiş olan yöntemin ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasındaki güvenilirliğini test etmek ve yerini belirlemek amacıyla daha önceden yapılmış olan ve Sattarvand (2009) tarafından çözülmüş olan 2B bir problemin ele alınması uygun görülmüştür. Bu problemin çözümüyle önceki örnekten daha büyük boyutlu bir

w	w	w	w	w	w	3	6	w	2	w	1	w	w	6	1	w	1	7	6	8	1	w	4	7	w	1	6	w	8	w	w	w	4	5	7	8	4	2	8	w	3	w	w	w	w	w	w	
w	w	w	w	w	6	8	1	w	4	7	w	1	6	w	2	w	7	8	w	4	6	w	1	4	8	w	7	5	8	w	1	8	3	w	6	7	1	8	5	w	1	5	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	4	6	w	1	4	8	w	7	5	8	w	7	8	w	8	5	5	w	3	4	w	1	5	6	w	w	6	8	w	4	w	w	w	3	2	w	w	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	5	5	w	w	3	4	w	1	5	6	8	7	6	8	8	2	3	1	w	2	w	2	1	4	w	8	7	4	8	w	1	2	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	8	2	3	1	w	2	w	2	1	4	w	3	4	w	7	5	w	1	8	5	w	6	6	w	5	7	w	2	4	w	w	w	4	6	6	w	7	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	5	5	w	1	8	5	w	6	6	w	5	2	w	w	3	3	8	w	4	2	6	6	4	w	7	2	w	w	w	5	7	3	2	2	w	5	6	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	3	8	w	4	2	6	4	w	7	2	w	7	8	2	w	5	5	w	w	3	3	4	w	7	2	1	1	6	w	w	w	1	8	w	6	w	w	w	w	w	w	w	w	
w	w	w	w	w	5	5	w	w	w	w	3	4	7	w	w	5	8	w	2	4	8	3	1	w	1	3	3	7	w	w	w	7	4	3	4	6	7	1	4	w	3	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	2	4	8	3	1	w	1	3	7	w	w	4	w	w	1	6	w	1	6	w	w	w	w	5	w	4	4	w	1	2	6	w	5	5	1	w	w	w	w	w	w	w	w	w
w	w	w	w	w	8	w	1	6	w	w	w	w	5	w	4	4	5	w	w	3	6	w	2	w	1	w	w	2	w	1	5	8	2	2	7	6	w	w	8	w	w	w	w	w	w	w	w	

[illegible]

3.5.1 Açık ocak nihai sınırlarını bulma kabiliyetinin test edilmesi

[illegible]

102

[illegible]

Aynı blok model üzerinde hareketli koni yöntemi denenmiştir (Şekil 3.49). Nihai ocak sınırları içerisinde 201 blok yer almaktadır. Ocağın ekonomik değeri ise +303'tür.

[illegible]

Yukarıdaki çalışmalardan sonra elde edilen sonuçlara bir de geliştirilen yöntem (Gelişmiş Hareketli Koni Analizi) ile elde edilen sonuçlar eklenmiştir (Şekil 3.50). Bu ocak içerisinde toplam 217 blok bulunmaktadır ve ocağın toplam ekonomik değeri +321'dir. Belirlenen ocak içerisinde 151 cevher bloğu ve 66 pasa bloğu bulunmaktadır.

[illegible]

Yapılan nihai sınır belirleme çalışmalarının özet bilgileri aşağıdaki tabloda görülmektedir (Çizelge 3.5). Bu tabloda görüldüğü üzere geliştirilmiş olan yöntem diğer bazı yöntemlere göre daha avantajlı gözükmemektedir. LG algoritması ile neredeyse aynı sonuçları vermektedir.

Çizelge 3.5 : Geliştirilen yöntemin diğer yöntemler ile karşılaştırılması.

<i>Yöntem</i>	<i>Nihai Ocak t a k i Toplam Blok Sayısı</i>	<i>Nihai Ocak Ekonomik Değeri</i>
<i>LG Algoritması</i>	222	320
<i>Korobov Algoritması</i>	379	68
<i>Hareketli Koni Yöntemi</i>	201	303
<i>Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi</i>	217	321

3.5.2 Yöntemin üretim sıralaması kabiliyetinin test edilmesi

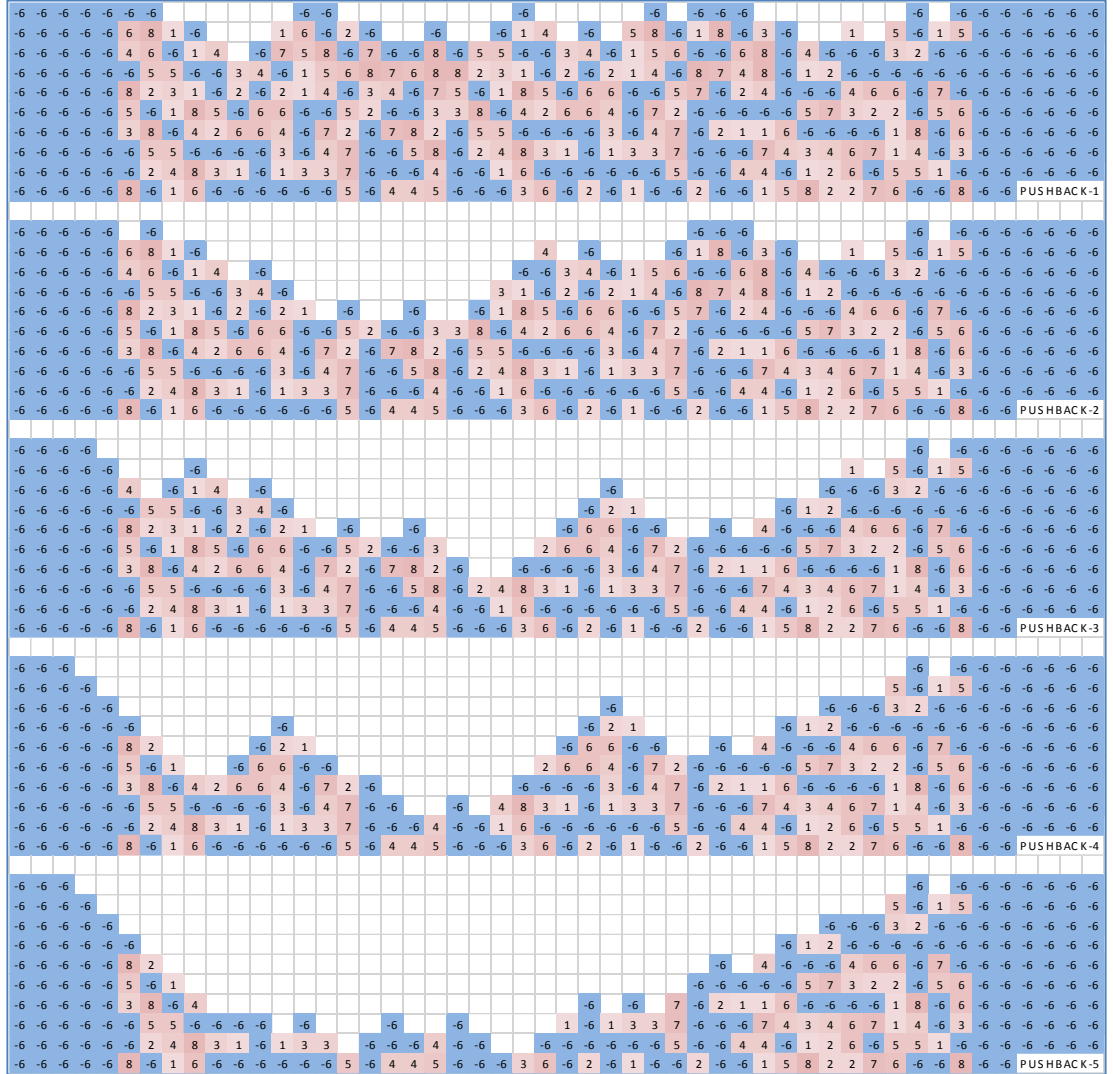
Geliştirilmiş olan yöntemin verimliliğini denemek amacıyla üretim planlama yöntemlerinden Wang ve Sevim (1995) yöntemiyle karşılaştırılması düşünülmüştür. Bir önceki bölümde kullanılan ve 500 blok içeren örnek model tekrar kullanılmıştır (Şekil 3.46).

Bölüm 2.3.2.2’de Wang ve Sevim (1995) tarafından önerilen yöntem ayrıntılarıyla anlatılmaktadır. Bu yöntem optimum ocak sınırlarını verme konusunda yetersiz olsa da parametreleştirme yönteminin verdiği ocak sınırlarına yakın sonuçlar vermektedir. Bu sezgisel yöntem, faz sıralamasında oluşan aralık problemini (gap problem) ortadan kaldırma konusunda parametreleştirme yönteminden üstündür. Parametreleştirme yöntemine göre bir miktar daha fazla hesaplama zamanı gerektirmektedir (Sattarvand, 2009).

Wang ve Sevim (1995) yönteminin nihai sınırları belirlemedeki dezavantajından dolayı; Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından bulunan sınırlar içerisinde kazı sıralamasının yapılması düşünülmüştür. Ancak LG algoritması ile belirlenen ocak nihai sınırlarının az da olsa farklı olmasından dolayı farklı blok içerikleriyle kazı sıralamasının karşılaştırılması uygun değildir. Bu nedenle; daha objektif bir karşılaştırma yapabilmek için kendi belirlemiş olduğumuz nihai ocak sınırların kullanılması uygun görülmüştür.

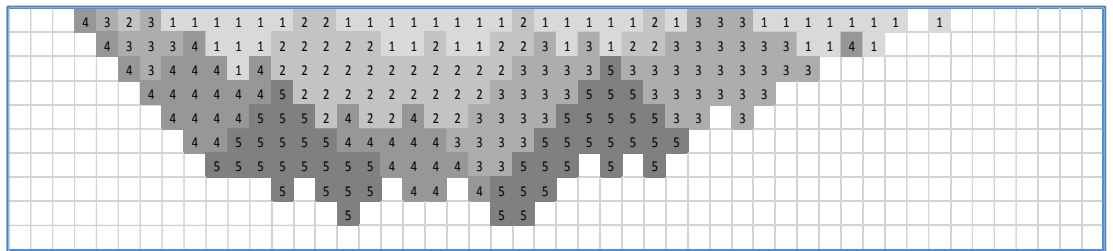
Nihai sınırları belirlenmiş olan örnek üzerinde Wang ve Sevim (1995) tarafından önerilen sezgisel yöntem ile kazı sıralaması ve faz tasarımı yapılmıştır. Bu yöntemle yapılan kazı sıralaması Sattarvand (2009) tarafından bulunan sonuçlara göre biraz daha farklı çıkmıştır. İşlemler sonunda kazı sıralamasından elde edilen blok kümeleri gruplandırılarak fazlar haline getirilecektir. Her faz içerisinde 40 blok kazılması planlanmıştır. Yıllık iskonto oranı %10 kabul edilmiş ve ocağın ömrü 20 yıl kabul

edilmiştir. Elde edilen üretim sıralamasına göre her faz sonunda ocağın alacağı şekil gösterilmiştir (Şekil 3.51).



Şekil 3.51 : Sezgisel yöntem ile yapılan üretim sıralaması sonuçları.

Oluşturulan fazların sıralaması aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 3.52). Her fazda ne kadar cevher ve pasa yer aldığı, iskontolu ve iskontosuz faz değerleri tabloda verilmiştir (Çizelge 3.6).



Şekil 3.52 : Sezgisel yöntem ile elde edilen 5 faz.

Her fazda elde edilecek olan; cevher, dekapaj ve toplam blok sayısı ayrıca her dönemde elde edilen iskontolu net değer aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 3.53).

Ocak nihai sınırları içerisinde 151 cevher bloğu, 66 adet de pasa bloğu olmak üzere toplam 217 blok bulunmaktadır. Oluşturulan planlamada +321 birim olan iskontosuz ekonomik değerinin, paranın zaman değeri de hesaba katıldığında +166,61 birim olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.6 : Sezgisel yöntem ile elde edilen 5 faz ve verileri.

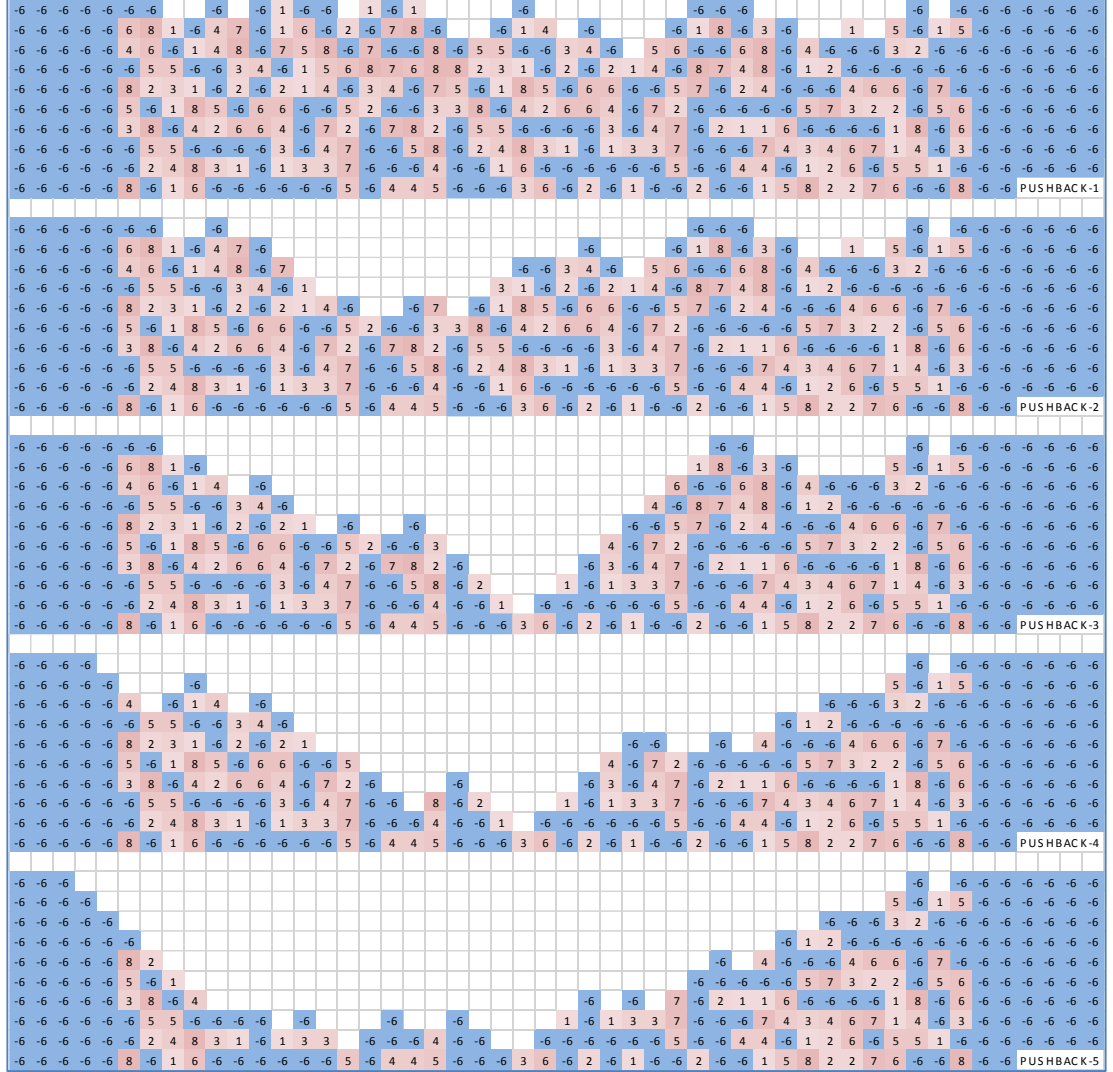
Faz (Pushback)	Cevher Bloğu Sayısı	Pasa Bloğu Sayısı	Toplam Blok Sayısı	İskontosuz Faz Değeri (Undiscounted)	Faz Tamamlanma Zamanı (yıl)	Kümülatif Faz Tamamlanma Zamanı (yıl)	İskontolu Faz Değeri (Discounted)
1	36	5	41	159	3,78	3,78	110,91
2	27	13	40	64	3,69	7,47	31,42
3	40	13	53	56	4,88	12,35	17,26
4	17	18	35	10	3,23	15,58	2,27
5	31	17	48	32	4,42	20,00	4,76
Toplam	151	66	217	321	20,00		166,61



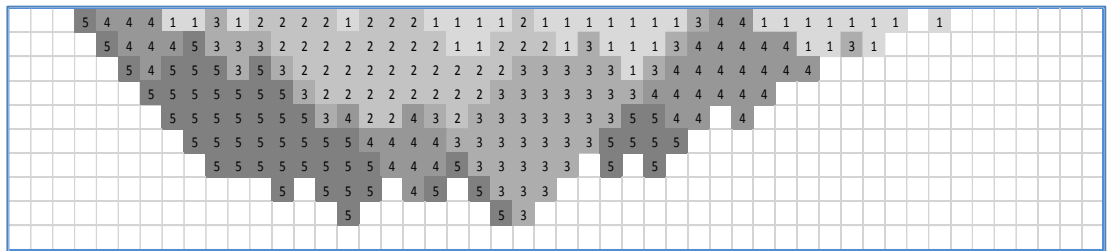
Şekil 3.53 : Her fazda elde edilen blok sayıları ve NBD (Wang&Sevim).

Yukarıda verilen örneğin gelişmiş hareketli koni yöntemi ile çözümü, yöntemin güvenilirliği konusunda yardımcı olacaktır. Bu amaçla algoritmanın çalışabilmesi için

Microsoft Excel programından faydalanılmıştır. Üretim sıralaması elde edilirken eş zamanlı olarak açık ocak nihai sınırları da bulunmuştur. Her dönem sonunda açık ocağın alacağı şekil aşağıda (Şekil 3.54) gösterilmiştir. Aynı anda bütün fazların sıralamasının görülebilmesi için dönemlerine göre numaralandırılmış ve aşağıda verilmiştir (Şekil 3.55).

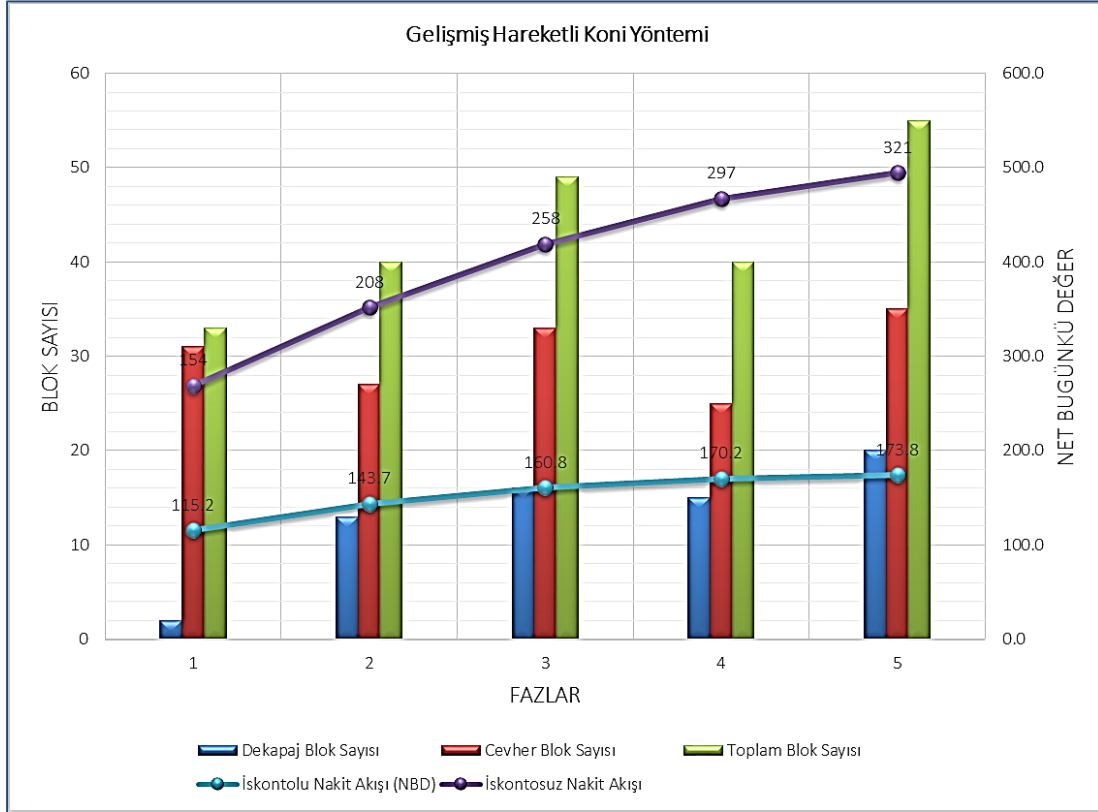


Şekil 3.54 : Hareketli koni analizi ile yapılan üretim sıralaması.



Şekil 3.55 : Hareketli koni analizi ile elde edilen 5 faz.

Üretim sıralamasının yapılmasıyla elde edilen sınırlar içerisinde 151 cevher bloğu ve 66 adet pasa bloğu olmak üzere toplam 217 blok bulunmaktadır. Oluşturulan planlamanın +321 birim olan ekonomik değerinin, paranın zaman değeri de hesaba katıldığında +173,77 birim olduğu tabloda (Çizelge 3.7) görülmektedir. Her fazda elde edilecek olan; cevher, dekapaj ve toplam blok sayısı ayrıca her dönemde elde edilen iskontolu net değer aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 3.56).



Şekil 3.56 : Gelişmiş hareketli koni ile her fazdaki Blok Sayısı ve NBD grafiği.

Çizelge 3.7 : Gelişmiş hareketli koni ile elde edilen 5 faz ve verileri.

Faz (Pushback)	Cevher Bloğu Sayısı	Pasa Bloğu Sayısı	Toplam Blok Sayısı	İskontosuz Faz Değeri (Undiscounted)	Faz Tamamlanma Zamanı (yıl)	Kümülatif Faz Tamamlanma Zamanı (yıl)	İskontolu Faz Değeri (Discounted)
1	31	2	33	154	3,04	3,04	115,25
2	27	13	40	54	3,69	6,73	28,44
3	33	16	49	50	4,52	11,24	17,12
4	25	15	40	39	3,69	14,93	9,40
5	35	20	55	24	5,07	20,00	3,57
Toplam	151	66	217	321	20,00		173,77

Bu iki yöntemin karşılaştırılması amacıyla elde edilen sonuçlar tabloda (Çizelge 3.8) verilmiştir.

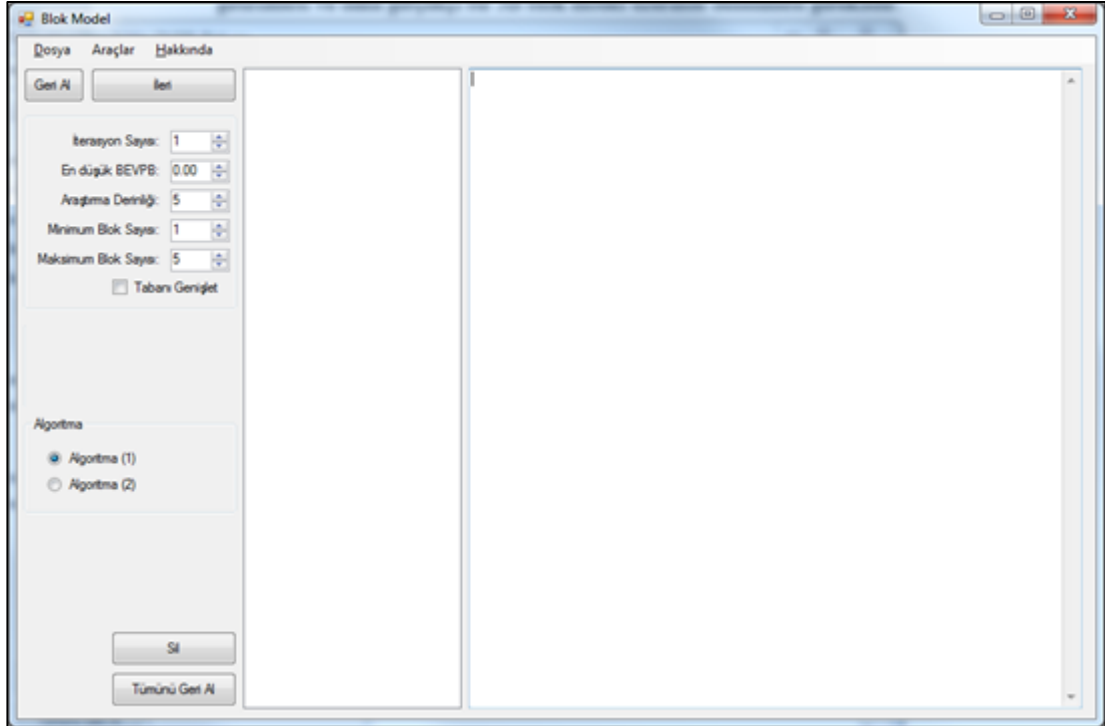
Çizelge 3.8 : İki yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Faz (Pushback)	LG + Wang&Sevim Yöntemi			Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi		
	Toplam Blok Sayısı	İskontosuz Faz Değeri (Undiscounted)	İskontolu Faz Değeri (Discounted)	Toplam Blok Sayısı	İskontosuz Faz Değeri (Undiscounted)	İskontolu Faz Değeri (Discounted)
1	41	159	110,91	33	154	115,25
2	40	64	31,42	40	54	28,44
3	53	56	17,26	49	50	17,12
4	35	10	2,27	40	39	9,40
5	48	32	4,76	55	24	3,57
Toplam	217	321	166,61	217	321	173,77

Bu tabloda görüldüğü gibi yeni yöntem; açık işletme sınırlarını belirleyebilme açısından LG algoritması ile aynı optimum sonuçları vermekte, üretim sıralaması açısından da (Wang ve Sevim, 1995) tarafından geliştirilen sezgisel yönteme göre net bugünkü değer maksimizasyonuna daha çok katkı sağlamaktadır.

3.6 Gelişmiş Hareketli Koni Algoritması Yazılımı

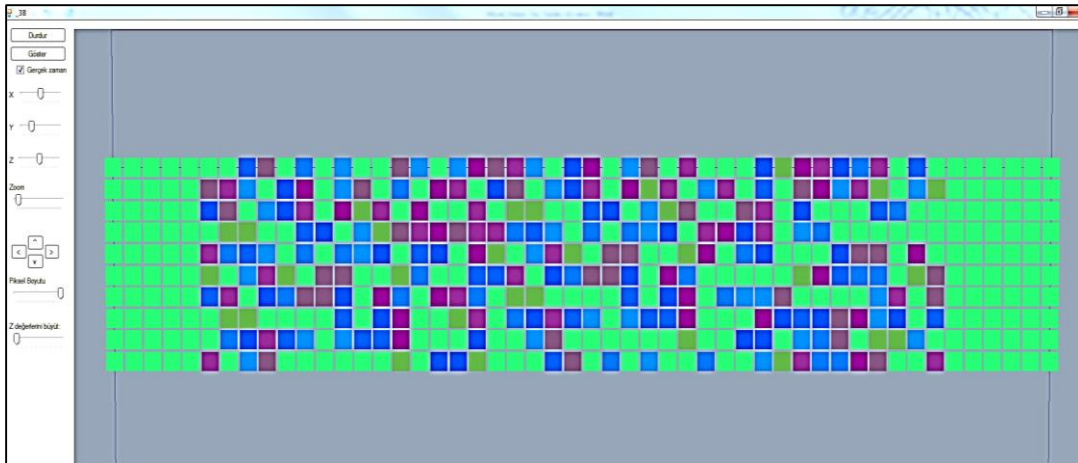
Geliştirilen yöntem, 2B uygulamalarda güvenilir sonuçlar verse de 3B blok modellerde vereceği sonuçlar daha önemlidir. Bu sebeple algoritmanın yazılım haline getirilmesi ve daha gerçekçi bir 3B blok model üzerinde denenmesi gereklidir. Geliştirilen algoritma, .NET ortamında MS Visual Basic programlama dili kullanılarak kodlanmıştır.



Şekil 3.57 : Programın genel görünümü.

Programın genel görünümü şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.57). Program Micromine programından elde edilen ve ekonomik değerleri hesaplanmış olan blok model dosyalarını tanıyabilecek şekilde kodlanmıştır. Böylece blok model oluşturulması, ekonomik değerlerin hesap edilmesi ve her türlü değişikliğin kolaylıkla yapılabilmesi için kod yazılmasına gerek görülmemiştir. Ana ekranda görülen İterasyon Sayısı ayarı sayesinde istenilen miktarda iterasyon yapılabilir. Maksimum Blok Sayısı ayarı sayesinde yıllık üretim (cevher + dekapaj) miktarının aşılması sağlanmaktadır. Tabanı Genişlet özelliği sayesinde normal şartlarda koninin uç kısmının ulaşamayacağı blok kombinasyonlarının incelenebilmesi sağlanmıştır. Koni tabanının genişletilmesi işlemi Bölüm 3.2.6 'de anlatılmıştır.

Programda istenilirse blok modelin 3B olarak görülebilmesi mümkündür. Her iterasyonda hangi blokların alındığı eş zamanlı olarak görülebilmektedir. Örnek olarak bir önceki bölümde kullandığımız 500 blok içeren modelin görünümü aşağıda verilmiştir (Şekil 3.58).



Şekil 3.58 : Programda 3B blok modelin görülebileceği pencere.

Geliştirilmiş olan algorithmada kullanılan özelliklerin dışında, gelecekteki araştırmalarda faydalı olabilecek olan Araştırma Derinliği ve Minimum Blok Sayısı vb. gibi farklı özellikler de program ekranında görülmektedir.

Program, iterasyonların sonlandırılmasının ardından bir adet log dosyası oluşturmaktadır. Bu log dosyasında iterasyonların ne kadar sürede tamamlandığı, iterasyon sayısı, iterasyonda kaç adet blok alındığı ve bu blokların kaç tanesinin cevher bloğu olduğu, kümülatif blok sayıları, toplam ekonomik değerleri, BEVPB değerleri ve iterasyonda alınan blokların bireysel numaraları bulunabilmektedir. Bu log dosyası CSV formatında olduğu için MS Excel ile açılabilir. Aynı zamanda entegre maden

planlama ve tasarım programları tarafından içeri aktarılarak gerekli bilgiler elde edilebilmektedir. Örnek bir log dosyası aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.59).

FILE																HOME	INSERT	PAGE LAYOUT	FORMULAS	DATA	REVIEW	VIEW	POWERPIVOT
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O								
1			Time	IT No	TBN	Ore	C_TBN	C_Ore	TBEV	C_TBEV	BEVPB	BLOCKS											
2	0	0	0.0231285	0	6	1	6	1	408686	408686	68114.33333	190504	193307	193329	193351								
3	0	0	0.0146235	1	13	5	19	6	2609487	3018173	200729.7692	196132	196154	196176	198982								
4	0	0	0.035385	2	25	13	44	19	7063990	10082163	282559.6	198959	198981	199003	201809								
5	0	0	0.0639845	3	16	9	60	28	4899848	14982011	306240.5	196175	199025	201831	193350								
6	0	0	0.0822009	4	6	3	66	31	1598392	16580403	266398.6667	201853	201876	204679	201899								
7	0	0	0.0746868	5	4	2	70	33	1054605	17635008	263651.25	204656	207483	210312	201830								
8	0	0	0.0672365	6	15	7	85	40	3573387	21208395	238225.8	196174	199024	193349	196197								
9	0	0	0.1439452	7	61	26	146	66	13605449	34813844	223040.1475	196151	198957	198979	201807								
10	0	0	0.375601	8	85	39	231	105	19683085	54496929	231565.7059	196150	198956	199000	201806								
11	0	0	0.9795907	9	114	54	345	159	25960375	80457304	227722.5877	196149	198955	198999	201805								
12	0	0	1.9554846	10	64	32	409	191	14272399	94729703	223006.2344	193345	196171	196193	190521								
13	0	0	1.5522578	11	49	23	458	214	11920975	106650678	243285.2041	187719	190543	190565	184893								
14	0	0	1.5424158	12	77	42	535	256	20561295	127211973	267029.8052	187740	190564	190586	193389								

Şekil 3.59 : Programdan elde edilen log dosyası örneği.

İterasyonların tamamlanmasının ardından blok model dosyası içerisine hangi bloğun hangi iterasyonda kazılması gerektiği işlenerek yeni bir blok model dosyası oluşturulmaktadır. Bu işlenmiş blok model dosyası içerisinde üretim sıralaması görülebilir. Micromine yazılımına uygun olarak işlenmiş olan örnek bir blok model dosyasının görünümü aşağıda verilmiştir (Şekil 3.60).

the_case_PRO_csv_islemis.csv

FILE	HOME	INSERT	PAGE LAYOUT	FORMULAS	DATA	REVIEW	VIEW	POWERPIVOT						
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	EAST," EAST"," NORTH"," NORTH"," RL"," RL"," Layer"," BEV"," BlokNo"," ITERASYON"													
2	DOUBLE,"FLOAT","DOUBLE","FLOAT","DOUBLE","FLOAT","CHARACTER","LONG","NUMERIC","NUMERIC"													
3	1485, 9985, 1045, 15, 15, 15, CENTRE													
4	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1060.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,0,-3													
5	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1075.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,1,-3													
6	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1090.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,2,-3													
7	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1105.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,3,-3													
8	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1120.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,4,-3													
9	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1135.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,5,-3													
10	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1150.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,6,-3													
11	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1165.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,7,-3													
12	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1180.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,8,-3													
13	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1195.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,9,-3													
14	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1210.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,10,-3													
15	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1225.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,11,-3													
16	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1240.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,12,-3													
17	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1255.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,13,-3													
18	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1270.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,14,-3													
19	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1285.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,15,-3													
20	1500.0000000000000000,15.000000000,10000.0000000000000000,15.000000000,1300.0000000000000000,15.000000000,"waste",-33750,16,-3													

Şekil 3.60 : Programdan elde edilen işlenmiş blok model dosyası örneği.

Program çıktısı olarak elde edilen log dosyası ve işlenmiş blok model dosyası ile Micromine üzerinde istenilen bilgiye rahatlıkla ulaşılabilir. Elde edilen blok kümelerinin yıllık üretim planına göre gruplandırılması da Micromine programı üzerinde oluşturulan bir makro sayesinde yapılmaktadır.

4. ÖRNEK BİR SAHA ÜZERİNDE YÖNTEMİN UYGULANMASI

Geliştirilen yöntemin uygulanabilirliğinin test edilmesi, diğer yöntemlerle karşılaştırılabilmesi ve sonuçların değerlendirilebilmesi için örnek bir sahada uygulama yapılması uygun görülmüştür. Bu amaçla gerçek bir sahadan elde edilen sondaj verileri ve topoğrafya üzerinde mantıksal değişiklikler yapılarak yeni bir saha düzenlenmiştir. Bu saha üzerinde öncelikle madencilik programlarından biri ile daha sonra da bu çalışmanın konusu olan gelişmiş hareketli koni yöntemi ile üretim planlaması yapılacaktır.

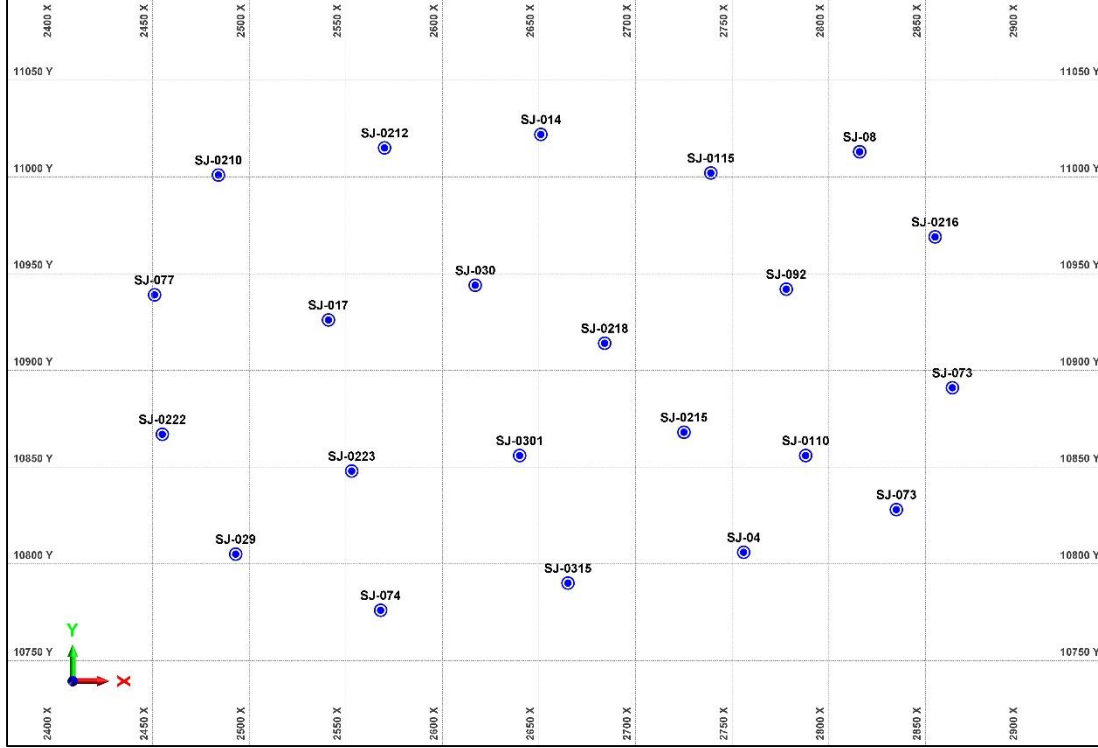
Bu amaçla; açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasının belirlenebilmesi için Micromine programından faydalanılmıştır. Micromine programında nihai sınırların ve üretim sıralamasının yapılabilmesi için Whittle tarafından desteklenen ve yöntem olarak LG algoritması kullanılan açık ocak optimizasyonu modülü bulunmaktadır. Bu modül iç içe ocaklar serisi oluşturarak üretim sıralaması yapmaktadır.

Hipotetik sahada öncelikle Whittle modülü kullanılarak elde edilen sonuçlara yer verilecek daha sonra da gelişmiş hareketli koni algoritması ile elde edilen sonuçlar paylaşılacaktır. Daha sonra elde edilen sonuçlar üzerinde değerlendirmeler yapılacaktır. Düzenlenen saha hakkındaki bilgiler aşağıda verilmiştir.

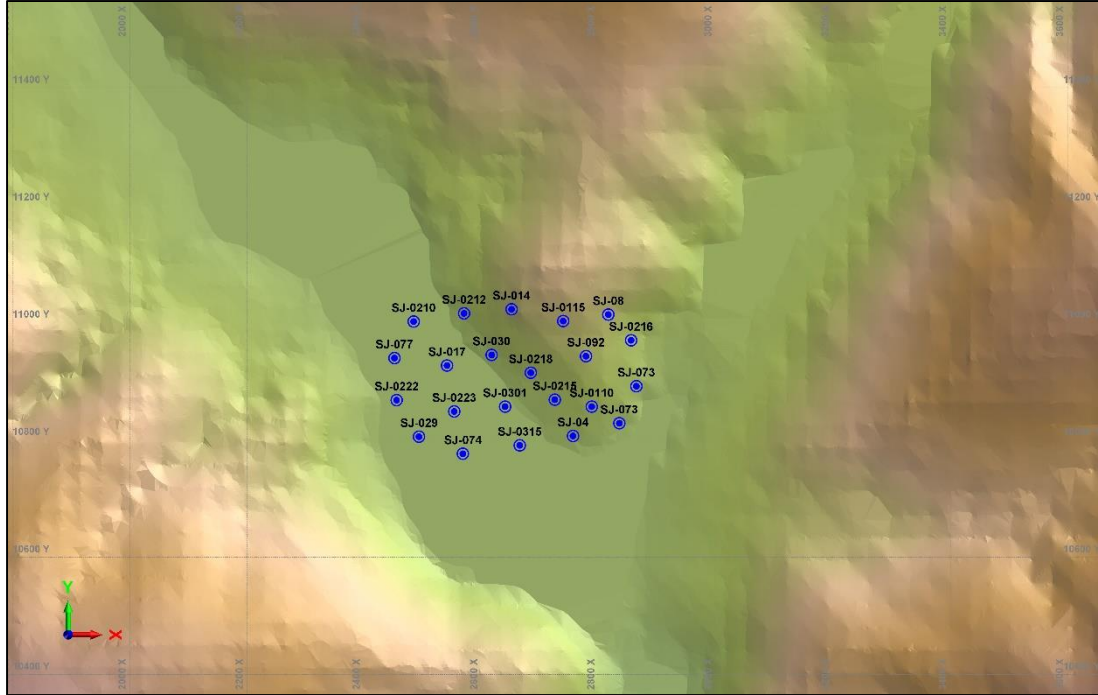
4.1 Sahanın ve Maden Yatağının Tanıtılması

Örnek sahada toplamda 21 adet cevher kesen sondaj bulunmaktadır. Bu sondajların plan görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.1). Cevher yatağının kuzey, güneydoğu ve güneybatısında yükselen üç tepe bulunmaktadır. Cevher, bu üç tepenin birleştiği yerde şekillenmiştir. Topoğrafya ve sondajların görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.2).

Sondaj karotlarından elde edilen analizlere göre sahada, tenörü %10 - %50 arasında değişen manyetit (Fe_3O_4) cevheri bulunmaktadır. Manyetit yoğunluğu ortalama 4 m^3/ton , yan kayacın yoğunluğu ise ortalama 3 m^3/ton kabul edilmiştir.

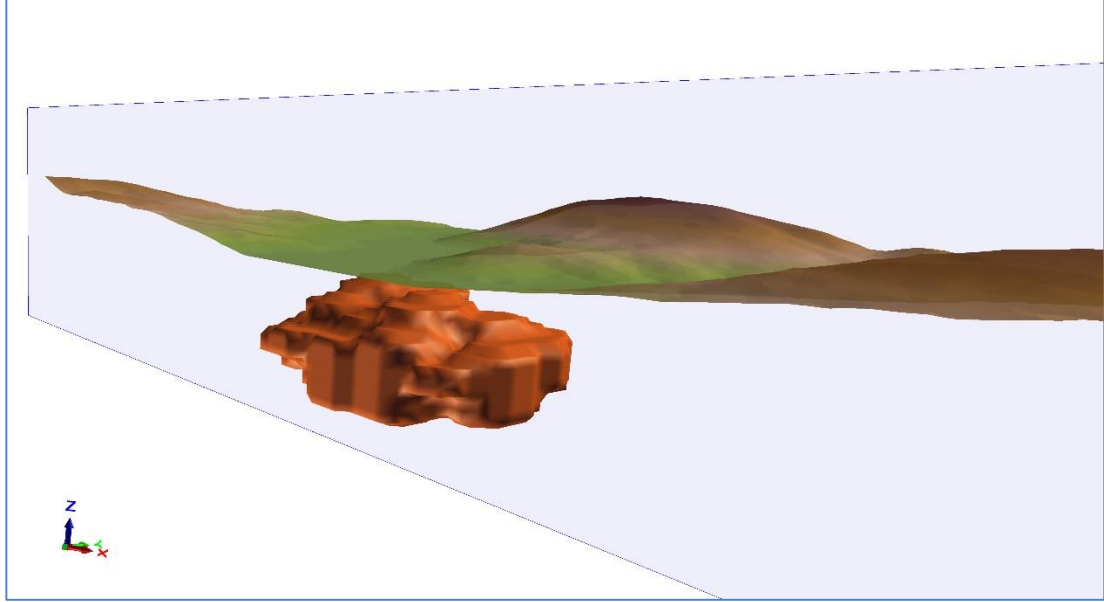


Şekil 4.1 : Örnek uygulamada kullanılan sondajlar (Plan görünüm)



Şekil 4.2 : Sondajlar ve topoğrafya (Plan görünüm)

Cevherin en derin noktası 1.115 kotunda en yüksek noktası ise 1.350 kotunda yer almaktadır. Yüzeye en yakın cevher oluşumu ile topoğrafya arasındaki kot farkı 25 m'dir. Cevher ve topoğrafyanın güneydoğudan görünümü aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 4.3).



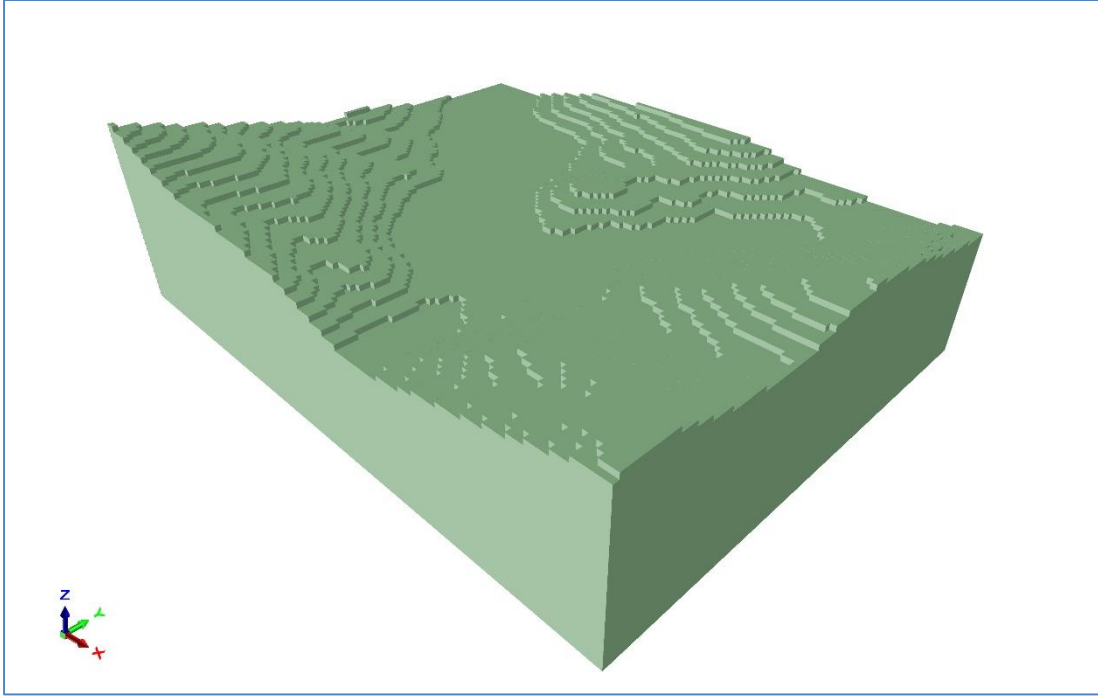
Şekil 4.3 : Cevher ve topoğrafya (GD görünümü).

4.2 Blok Model Özellikleri

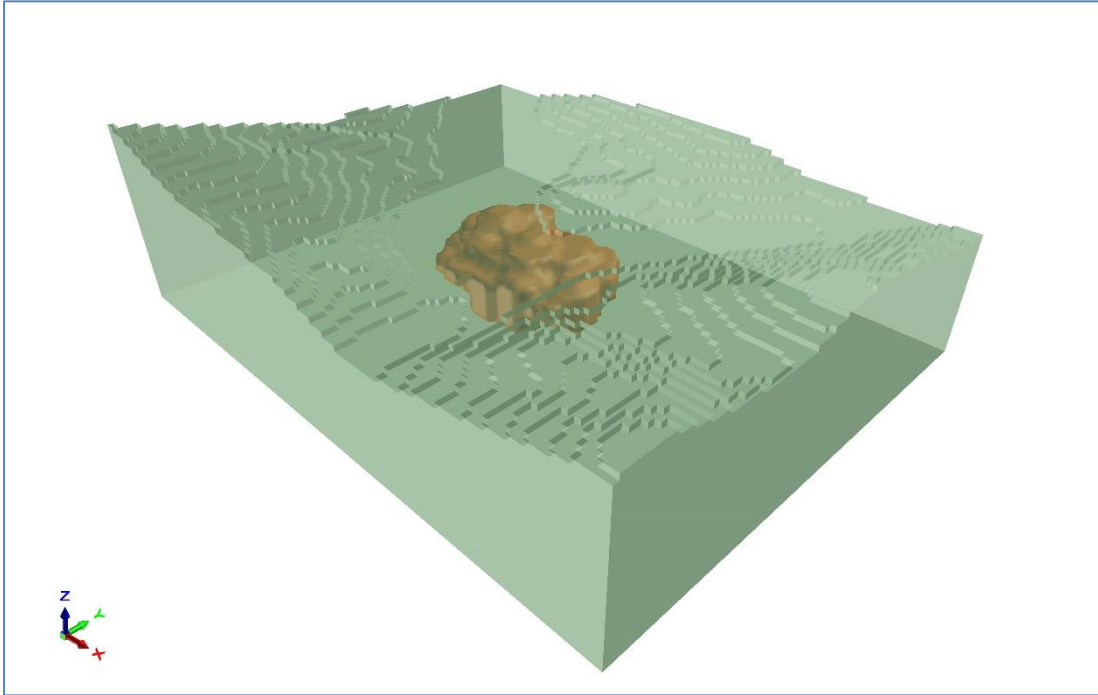
Açık ocak nihai sınırlarının bulunabilmesi ve üretim sıralamasının yapılabilmesi için cevher katı modeli ve yan kayaç blok model haline dönüştürülmüştür. Blok boyutları 15x15x15 m seçilmiştir. Bir bloğun hacmi 3.375 m³'tür. Oluşturulan bloklar, topoğrafya yüzeyi ile kesilmiş ve hava blokları blok modelin dışarısında bırakılmıştır (Şekil 4.4). Böylece sahanın tamamını temsil etmek için 279.658 blok oluşturulmuştur. Blok model için belirlenen boyutlar ve sınırlar aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 : Blok model boyutları ve koordinatları.

Koordinat	Minimum (m)	Maksimum (m)	Toplam Uzunluk (m)	Blok Boyutları (m)
X	1.800	3.600	1.800	15
Y	10.200	11.595	1.395	15
Z	1.060	1.585	525	15



Şekil 4.4 : Blok model (GD görünümü).

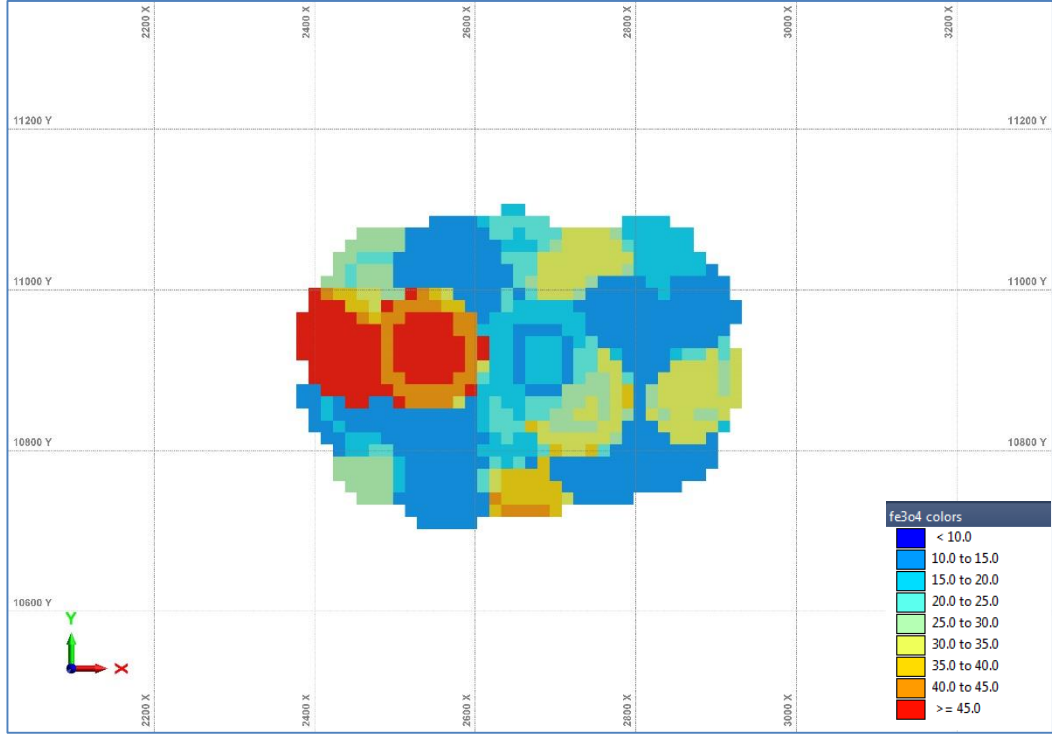


Şekil 4.5 : Blok model ve cevher katı modeli (GD görünümü).

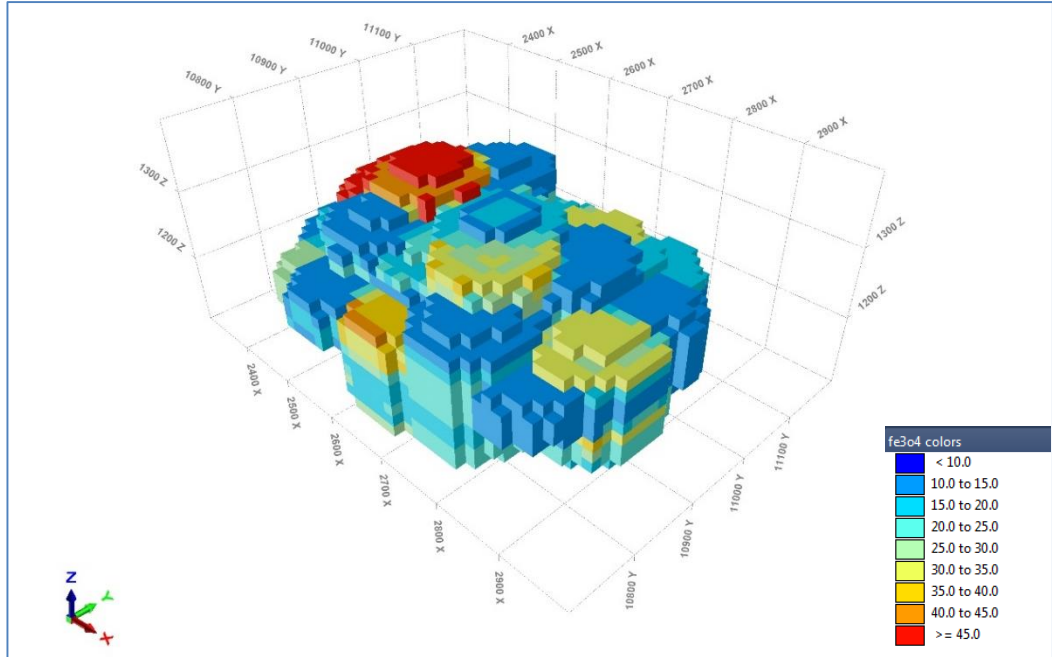
4.3 Cevher Tenör Değerlerinin Kestirimi

Oluşturulan blok modelde toplamda 7.983 cevher bloğu bulunmaktadır. Bu cevher bloklarına, uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma (Inverse Distance Weighting) yöntemi kullanılarak $\%Fe_3O_4$ tenör değerleri atanmıştır. Yapılan kestirimlere göre bu sahada;

tenörü %10 - %50 arasında değişen 107.770.500 ton manyetit (Fe_3O_4) cevheri bulunmaktadır. Elde edilen cevher blokları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7). Cevher blokları haricinde kalan 272.458 blok dekapaj bloğu olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.6 : Tenör değerleri atanmış cevher blokları (Plan görünüm).



Şekil 4.7 : Tenör değerleri atanmış cevher blokları (GD görünümü).

4.4 Blok Ekonomik Değerlerinin Hesaplanması

Elde edilen 279.658 bloğa içerdiği cevher miktarlarına göre ekonomik değerler atanmıştır. Blok ekonomik değerleri belirlenirken daha önceden belirtilen formüllerden (Eşitlik (2.1)-(2.7)) faydalanılmıştır. Bu formüllerde kullanılan gelir ve gider kalemleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.2). Gelir kalemini belirleyen; %65 Fe₃O₄ manyetit içeren konsantre cevherin satış fiyatı, (170 TL/ton) TMMOB 2014 yılı verilerinden elde edilmiştir. Gider kalemlerinde yer alan maliyetler ise benzer ocakların maliyetleri göz önünde bulundurularak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Birim maliyetler, normal şartlarda bir ocağın üretim planlamasında çok etkili olan değişkenlerdir ve hassasiyetle belirlenmelidir.

Çizelge 4.2 : Açık işletme gelir ve giderleri.

Gelirler	TL / ton	TL / m³
Konsantre Cevher Satış Geliri	170	
Giderler	TL / ton	TL / m³
Cevher Kazı Maliyeti	5	
Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Maliyeti	12	
Cevher Satış Maliyeti ve Vergiler	40	
Dekapaj Kazı Maliyeti		8

Sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için karşılaştırılacak olan yöntemlerde kullanılması planlanan blok ekonomik değerlerinin birbiriyle aynı olması gerekmektedir. Bu nedenle bütün blokların blok ekonomik değerleri en baştan belirlenecek ve belirlenen değerler kullanılarak farklı yöntemlerle üretim planlaması yapılacaktır. Böylece her iki yöntem için girdi olan blok ekonomik değerlerinin farklı olma olasılığı ortadan kalkmış olacaktır. Bu hesabın blok modelde yer alan her bir blok için yapılabilmesi amacıyla Micromine programında yer alan araçlardan faydalanılmıştır.

4.5 İç İçe Ocaklar Serisi Yöntemi ile Üretim Planlaması (Whittle)

Bu bölümde Micromine (Versiyon: 2014, Lisans No: MM3759) içerisinde yer alan ve Whittle tarafından desteklenen açık ocak optimizasyonu modülü kullanılarak nihai sınırlar bulunacak ve daha sonra üretim sıralaması yapılacaktır. Bu modülde LG

algoritması ile nihai sınırlar bulunurken gelir ayarlama faktörü (RAF) kademeli olarak artırılır ve iç içe ocaklar serisi (Nested Pits) oluşturularak üretim planlaması yapılır. Daha sonra üretim sıralamasını yıllara göre belirleyebilmek için; elde edilen bu iç içe ocaklar serilerinden faydalanılarak en iyi durum (The Best Case), en kötü durum (The Worst Case) veya sabit ilerleme (Constant Lag (Milawa)) senaryosu uygulanabilir.

Bu optimizasyon modülü aslında Geovia Whittle™ adıyla bilinen ve ticari bir yazılım olarak satışa sunulan bir programdır. Bu modül kullanılarak karşılaştırma yapılmasındaki amaç bu modülün doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek değil kendi oluşturmuş olduğumuz algoritmanın konumunu belirlemektir. Bu amaçla en çok kullanılan programlardan biri olan Whittle seçilmiştir. Yaygın olarak kullanılan bir diğer program ise Minemax Planner™ isimli programdır. Bu program maksimum akış algoritması kullanarak çalışmakta ve LG algoritması ile aynı nihai sınırları vermektedir. Üretim sıralaması amacıyla da yine gelir ayarlama faktörü kullanıldığı için iki program da birbirine benzer sonuçları vermektedir.

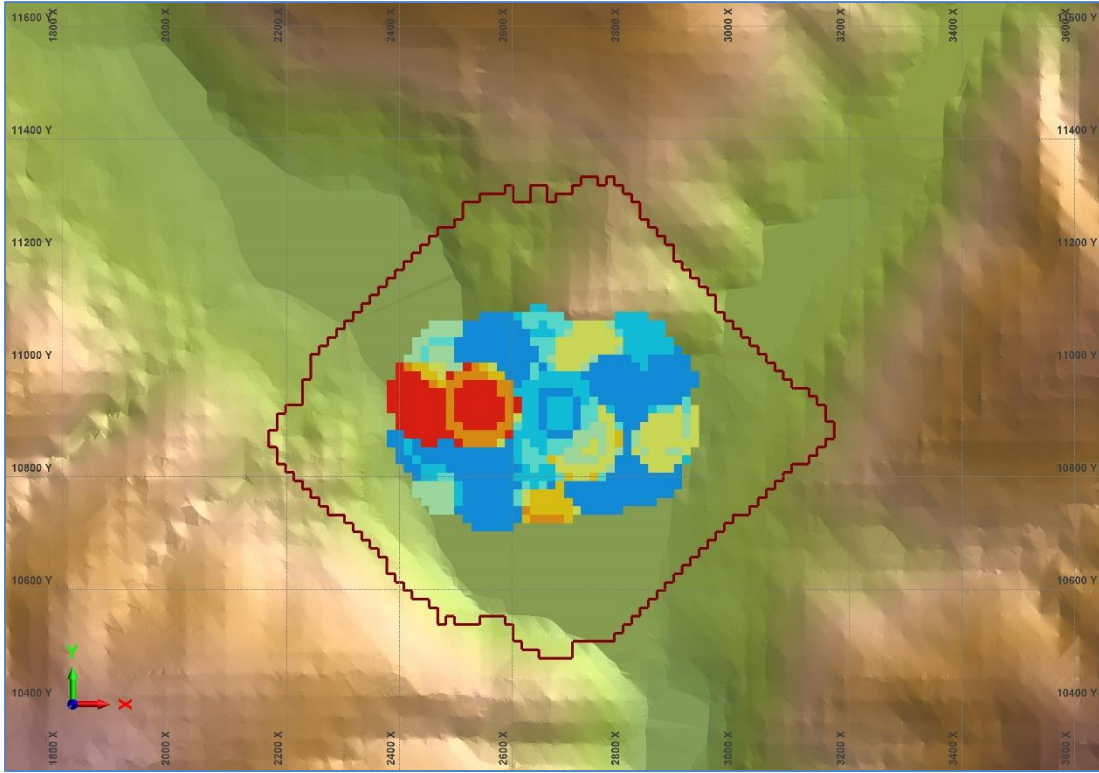
4.5.1 Lerchs ve Grossmann algoritması ile nihai sınırların bulunması

LG algoritmasının uygulanması ile bulunan açık ocak sınırları içerisinde toplam 104.166.000 ton (26.041.500 m³) cevher ve 144.504.000 ton (48.168.000 m³) dekapaj bulunmuştur. Ocağın toplam hacmi 74.209.500 m³ toplam tonajı ise 248.670.000 ton'dur. Dekapaj oranı ise 1.39 ton/ton olarak rapor hesaplanmıştır. Raporda verilen bilgiler aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Çizelge 4.3).

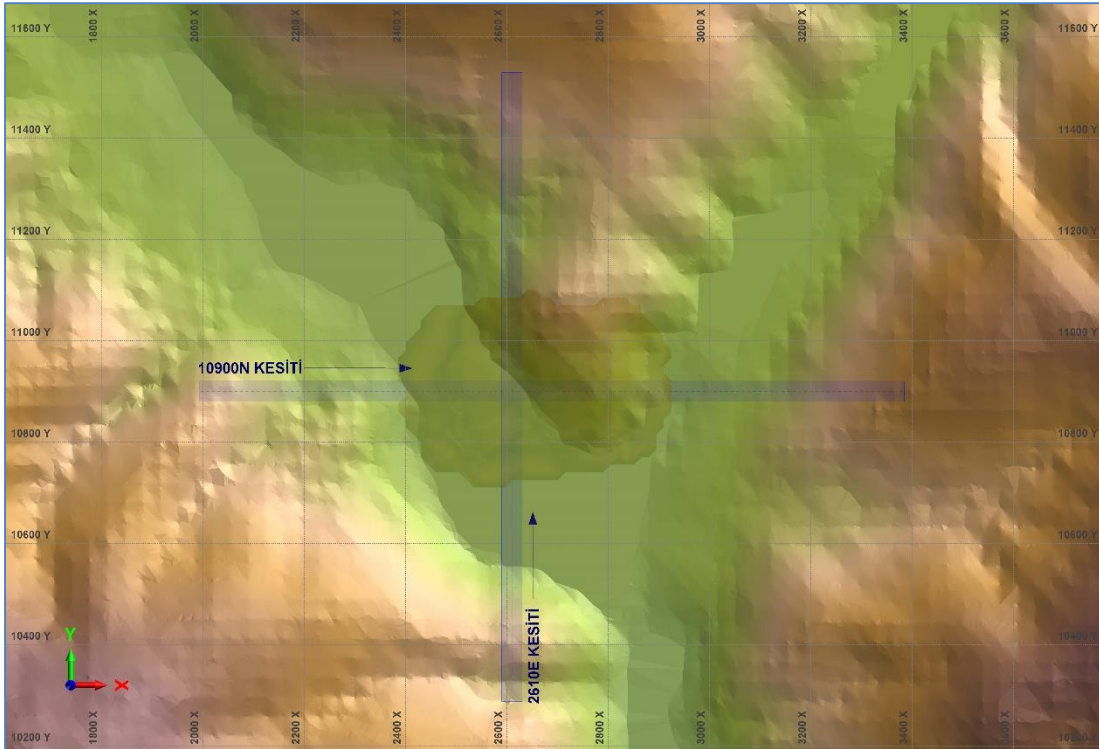
Çizelge 4.3 : LG algoritması ile elde edilen sonuçlar.

	<i>Hacim (m³)</i>	<i>Tonaj (ton)</i>	<i>Dekapaj Oranı (ton/ton)</i>	<i>Toplam Ocak Tonajı (ton)</i>	<i>Kazanç (TL)</i>
Cevher	26,041,500	104,166,000			
Dekapaj	48,168,000	144,504,000			
Toplam	74,209,500	248,670,000	1.39	248,670,000	1,380,800,860

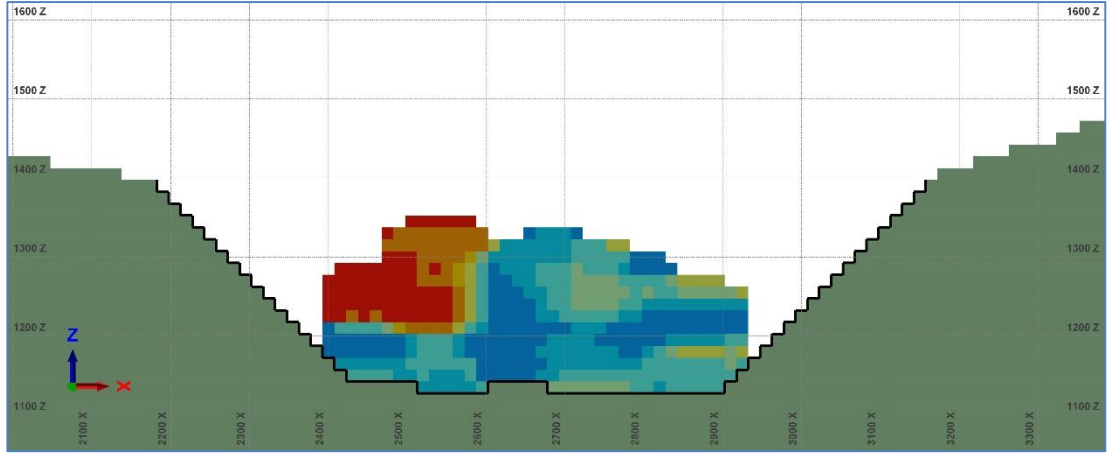
LG algoritması kullanılarak açık ocak nihai sınırlarına erişildiğinde elde edilecek iskontosuz toplam kazanç 1.380.800.860 TL olarak bulunmuştur. Belirlenen nihai sınırların plan, kesit ve izometrik görünümüleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Burada alınan kesitler ve ileride sık sık tekrarlanacak olan kesitler 10.900 Kuzey ve 2610 Doğu hattından alınacaktır. Bu kesit yerleri şekilde gösterilmiştir (Şekil 4.9).



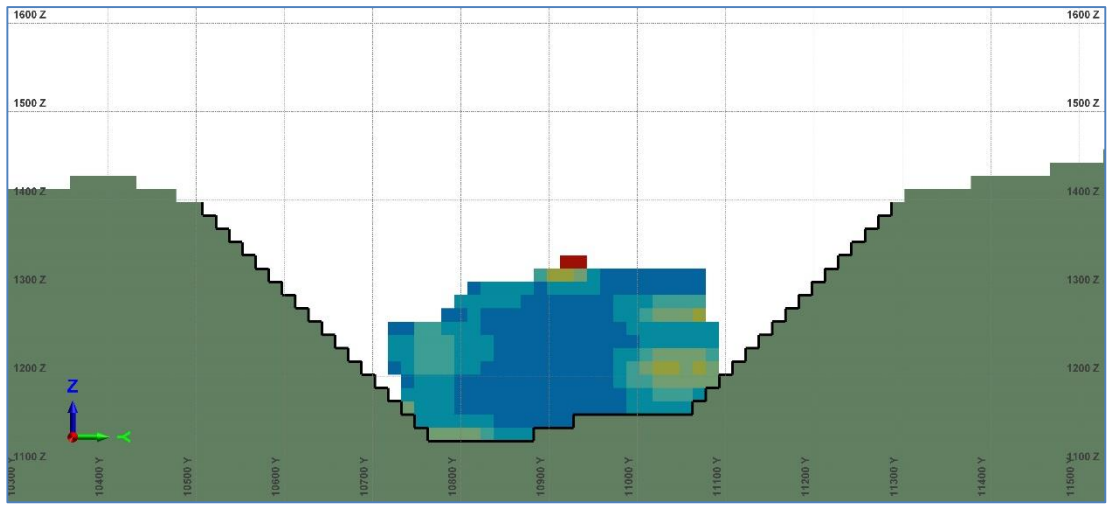
Şekil 4.8 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (Plan görünüm).



Şekil 4.9 : 10900N ve 2610E kesit yerleri (Plan görünüm).



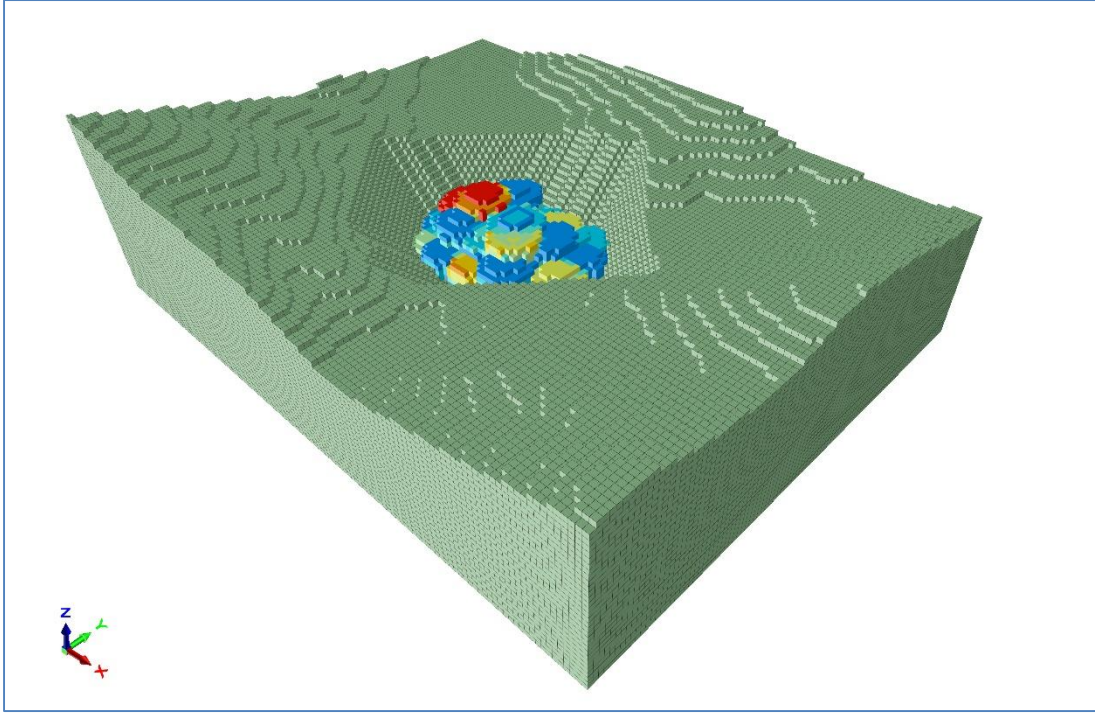
Şekil 4.10 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (10900N kesiti).



Şekil 4.11 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (2610E kesiti).

LG algoritması ile nihai sınırlar içerisinde 104.166.000 ton cevher bulunmaktadır. Maden yatağında yer alan 107.770.500 ton cevherden 104.166.000 ton cevherin üretilmesi ekonomik gözükmemektedir. Açık ocak nihai derinliği +1.112,5 kotundadır.

LG algoritması ile açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesinden sonra üretim sıralaması amacıyla iç içe ocaklar serisi elde edilir.



Şekil 4.12 : LG algoritması ile elde edilen nihai sınırlar (GD görünümü).

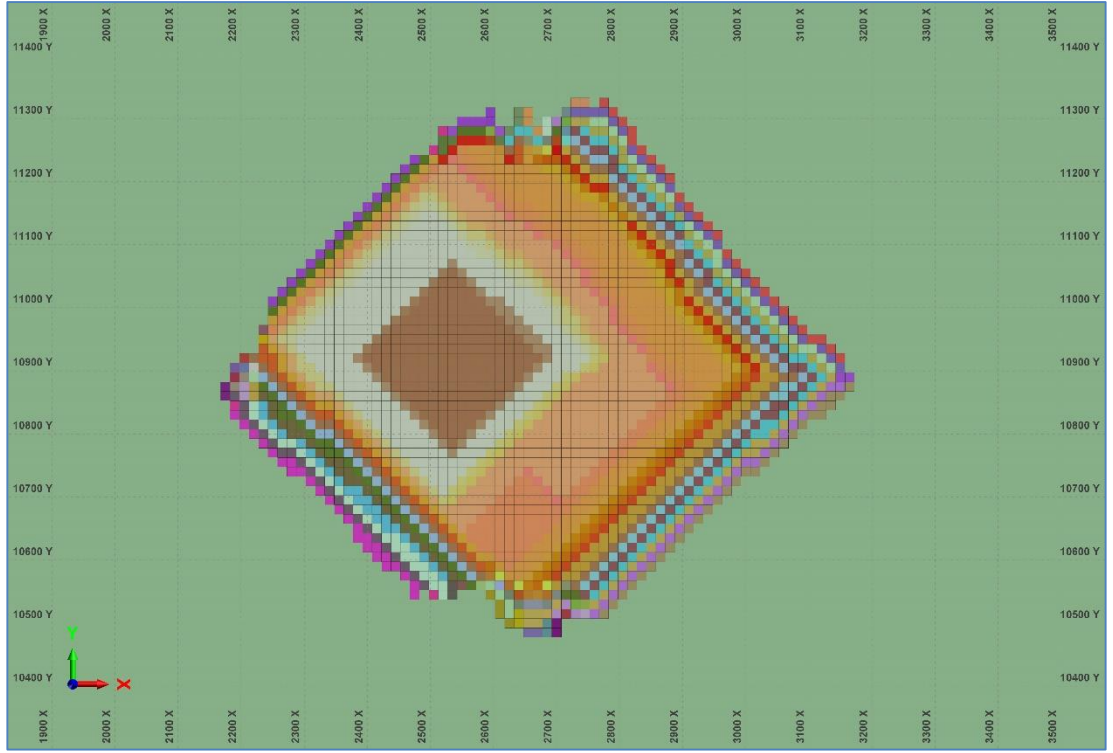
4.5.2 İç içe ocaklar serisi ile üretim sıralamasının elde edilmesi

İç içe ocaklar serisi ile elde edilecek üretim sıralamasında gelir ayarlama faktörü aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu faktör; öncelikle 0 ile 1 arasında 0,1 düzeyindeki artışlarla kullanılmıştır ancak ocaklar arasındaki aralık probleminden dolayı yıllık üretim miktarının çok altında veya çok üstünde miktarlar elde edilmiştir. Daha sonra gelir ayarlama faktörü 0 ve 1 arasında değişen ancak bu kez 0,01 değerli aralıklarla 100 analiz yapılmıştır. Elde edilen ocak hacimlerine bakıldığında ilk yıllardaki üretim miktarının gerekenden fazla olduğu gözlenmiştir.

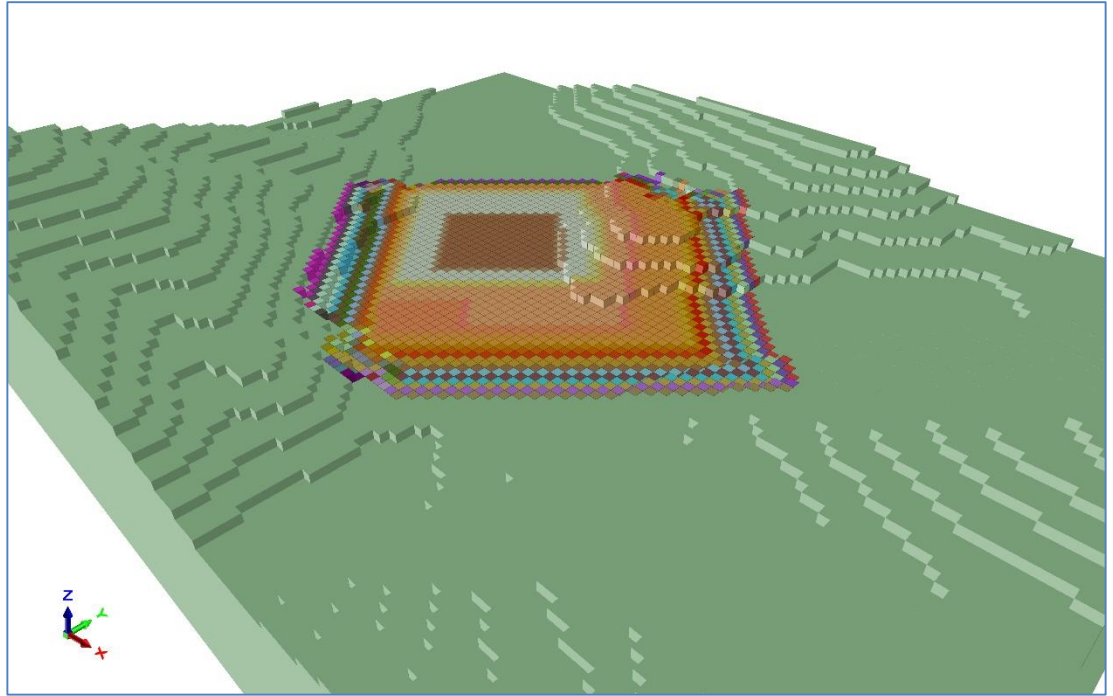
İstenilen ocak hacim artışının elde edilebilmesi için gelir ayarlama faktörü aralıklarının 0,001 olarak girilmesi uygun görülmüştür. Böylece 1.000 farklı gelir ayarlama faktörü kullanılarak yapılan analizler ile iç içe ocaklar serisi elde edilmiştir.

Gelir ayarlama faktörü aralıkları sabit olmak zorunda değildir. Farklı aralıklarda farklı artışlar uygulamak mümkündür. Örneğin; 0-0,1 arasında 0,01 değerli artışlar ardından 0,1-1,0 arasında 0,1 değerli artışlar uygulayarak ocaklar serisi elde edilebilir.

Gelir ayarlama faktörünün 1 olduğu durum açık ocak nihai sınırlarını vermektedir. Gelir ayarlama faktörlerine göre elde edilen iç içe ocaklar serisi aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16).



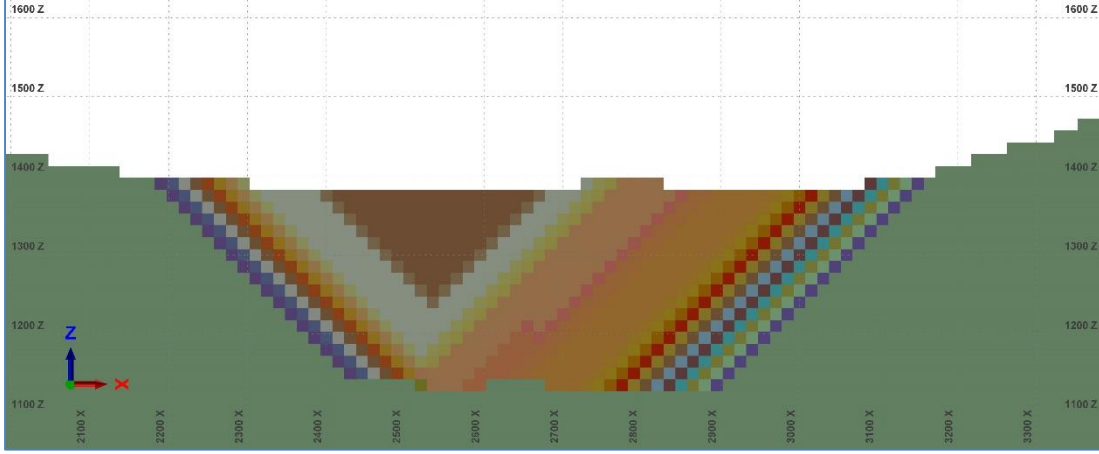
Şekil 4.13 : İç içe ocaklar serisi (Plan görünüm).



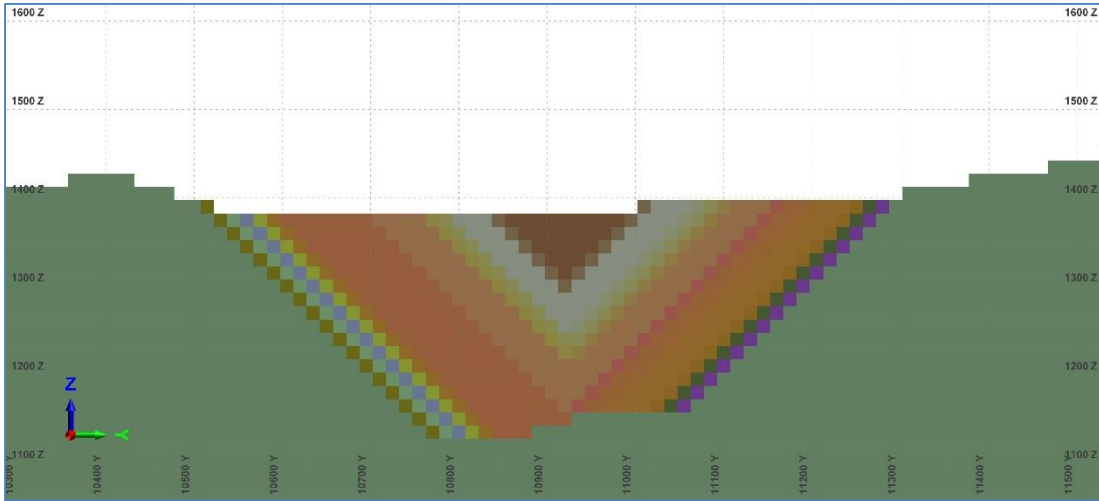
Şekil 4.14 : İç içe ocaklar serisi (GD görünümü).

İç içe ocaklar serisinde elde edilen ilk ocak, gelir ayarlama faktörünün 0,08 olduğu durumda elde edilmiştir. İç içe ocaklar elde edilirken sabit aralıklı faktörler kullanılmasına rağmen ocak hacminde düzensiz artışlar gözlenmektedir. Bu yöntemin dezavantajlarından biri de budur. Ancak bu faktörlerle elde edilen ocakların yıllık

Üretim planı olmadđđı unutulmamalıdır. Yıllık retim miktarının her yıl uygun olarak elde edilebilmesi, i i ocaklar serisinde elde edilen ocakların birleştirilmesiyle elde edilmektedir.



Şekil 4.15 : İ i ocaklar serisi (10900N kesiti).



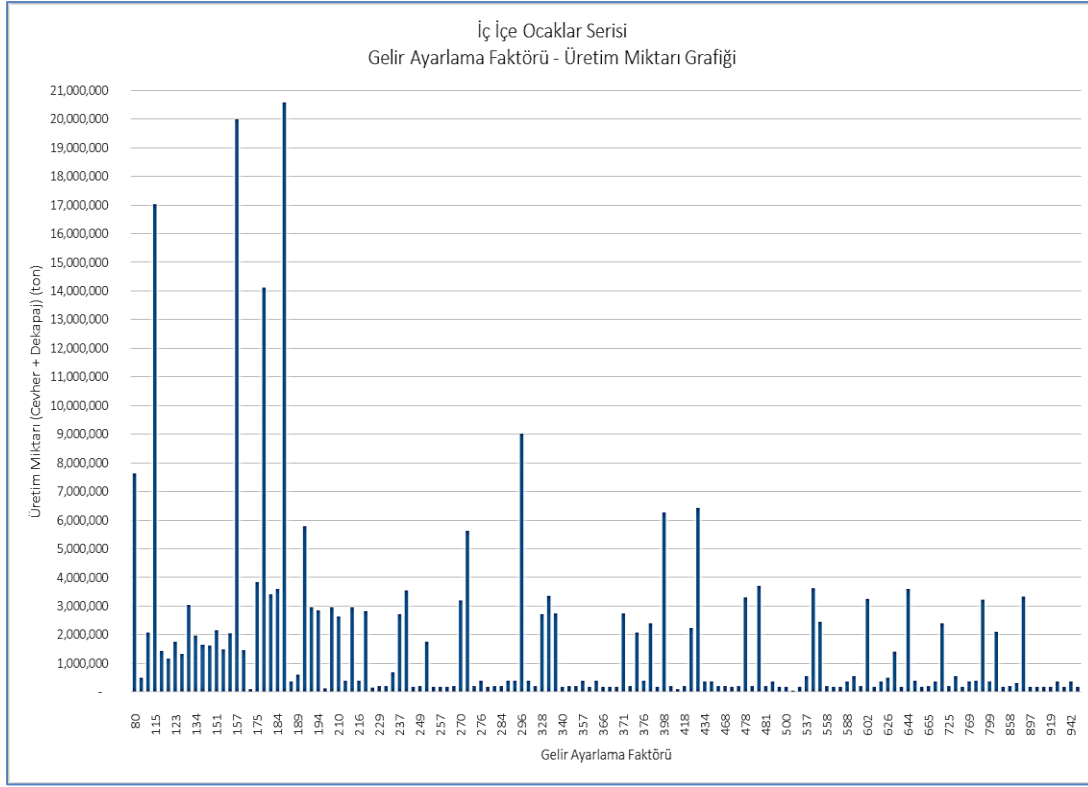
Şekil 4.16 : İ i ocaklar serisi (2610E kesiti).

Gelir ayarlama faktörü (RAF) değişimi ile elde edilen ocaklardan bir kısmının içerdiği cevher ve dekapaj miktarları, dekapaj oranları, gelir, gider ve kazanç miktarları aşağıdaki tabloda verilmiştir (izelge 4.4). Bu tablonun tamamı Ek.1'de verilmiştir. Bu rapordaki miktarların kümülatif değerler olduğu unutulmamalıdır. Bunun nedeni; i i ocaklar serisinde gelir ayarlama faktörü arttırıldđđında oluşan her ocağın bir öncekini de içerisine alan daha büyük bir ocak olmasıdır. Her iterasyonda elde edilen üretim miktarları (cevher + dekapaj) grafikte verilmiştir (Şekil 4.17).

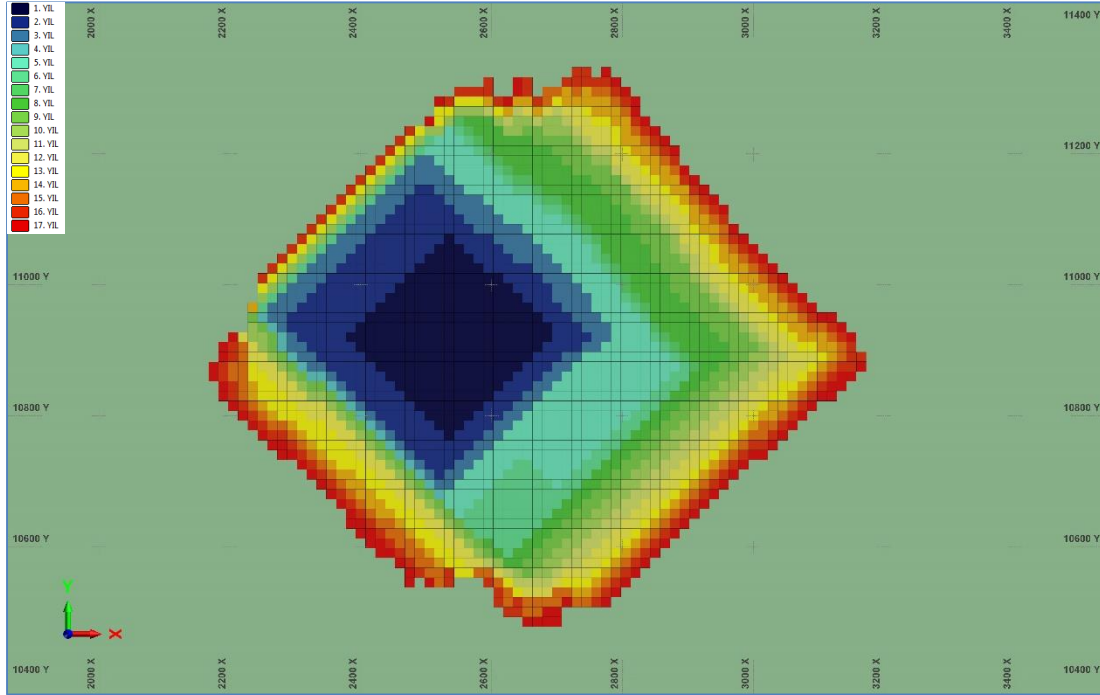
Çizelge 4.4 : İç içe ocaklar serisi raporu (kısaltılmış).

RAF	Cevher (m³)	Dekapaj (m³)	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Dekapaj Oranı (ton/ton)	Toplam Ocak (ton)	Gelir (TL)	Gider (TL)	Kazanç (TL)
0.079	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	11,406,429	11,367,000	39,429
0.080	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	11,550,814	11,367,000	183,814
0.081	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	11,695,199	11,367,000	328,199
0.082	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	11,839,585	11,367,000	472,585
0.083	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	11,983,970	11,367,000	616,970
0.084	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,128,355	11,367,000	761,355
0.085	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,272,740	11,367,000	905,740
0.086	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,417,125	11,367,000	1,050,125
0.087	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,561,510	11,367,000	1,194,510
0.088	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,705,896	11,367,000	1,338,896
0.089	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,850,281	11,367,000	1,483,281
0.090	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	12,994,666	11,367,000	1,627,666
0.091	840,375	1,420,875	3,361,500	4,262,625	1.27	7,624,125	13,139,051	11,367,000	1,772,051
0.092	891,000	1,522,125	3,564,000	4,566,375	1.28	8,130,375	14,094,511	12,177,000	1,917,511
0.093	891,000	1,522,125	3,564,000	4,566,375	1.28	8,130,375	14,247,712	12,177,000	2,070,712
0.094	891,000	1,522,125	3,564,000	4,566,375	1.28	8,130,375	14,400,913	12,177,000	2,223,913
0.095	891,000	1,522,125	3,564,000	4,566,375	1.28	8,130,375	14,554,114	12,177,000	2,377,114
0.096	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	17,723,899	15,174,000	2,549,899
0.097	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	17,908,523	15,174,000	2,734,523
0.098	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	18,093,147	15,174,000	2,919,147
0.099	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	18,277,771	15,174,000	3,103,771
0.100	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	18,462,395	15,174,000	3,288,395
0.101	1,130,625	1,896,750	4,522,500	5,690,250	1.26	10,212,750	18,647,019	15,174,000	3,473,019
~~~~~									
0.974	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,719,798,299	384,912,000	1,334,886,299
0.975	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,721,564,005	384,912,000	1,336,652,005
0.976	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,723,329,712	384,912,000	1,338,417,712
0.977	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,725,095,419	384,912,000	1,340,183,419
0.978	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,726,861,125	384,912,000	1,341,949,125
0.979	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,728,626,832	384,912,000	1,343,714,832
0.980	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,730,392,539	384,912,000	1,345,480,539
0.981	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,732,158,245	384,912,000	1,347,246,245
0.982	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,733,923,952	384,912,000	1,349,011,952
0.983	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,735,689,659	384,912,000	1,350,777,659
0.984	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,737,455,365	384,912,000	1,352,543,365
0.985	26,034,750	48,114,000	104,139,000	144,342,000	1.39	248,481,000	1,739,221,072	384,912,000	1,354,309,072
0.986	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,741,418,832	385,344,000	1,356,074,832
0.987	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,743,184,977	385,344,000	1,357,840,977
0.988	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,744,951,122	385,344,000	1,359,607,122
0.989	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,746,717,267	385,344,000	1,361,373,267
0.990	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,748,483,411	385,344,000	1,363,139,411
0.991	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,750,249,556	385,344,000	1,364,905,556
0.992	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,752,015,701	385,344,000	1,366,671,701
0.993	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,753,781,846	385,344,000	1,368,437,846
0.994	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,755,547,991	385,344,000	1,370,203,991
0.995	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,757,314,136	385,344,000	1,371,970,136
0.996	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,759,080,281	385,344,000	1,373,736,281
0.997	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,760,846,425	385,344,000	1,375,502,425
0.998	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,762,612,570	385,344,000	1,377,268,570
0.999	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,764,378,715	385,344,000	1,379,034,715
1.000	26,041,500	48,168,000	104,166,000	144,504,000	1.39	248,670,000	1,766,144,860	385,344,000	1,380,800,860

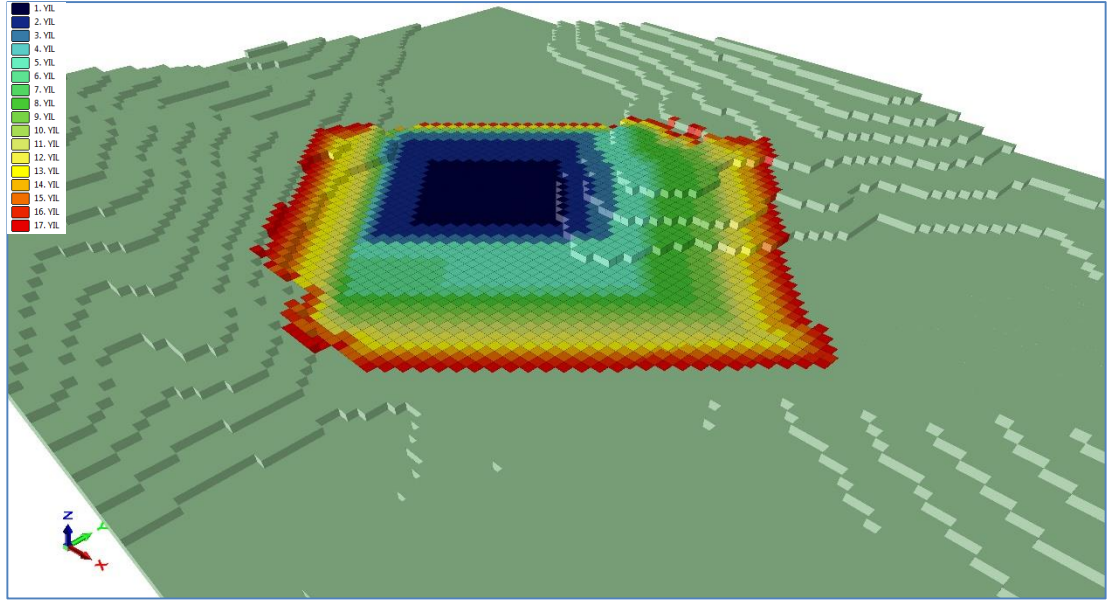
İç içe ocaklar serisinde elde edilen ocaklar, yıllık üretim kapasitesine uygun olarak birleştirilir ve üretim yıllarına bağlı olarak net bugünkü değerleri (NBD) hesaplanır. Net bugünkü değer hesaplanırken en iyi durum, en kötü durum ve sabit ilerleme senaryoları uygulanarak net bugünkü değerın değişimi gözlenebilir. Bu yöntemlerin ayrıntıları Bölüm 2.3.2.2’de anlatılmıştır. İç içe ocaklar serisindeki ocakların yıllık üretim kapasitesine göre birleştirilmesi program tarafından otomatik olarak yapılmaktadır. Bu birleştirme sonucu ortaya çıkan yıllık üretim miktarları, bu örnekte de olduğu gibi istenen üretim kapasitesini elde edemeyebilmektedir. Birleştirme işlemi sonucu ortaya çıkan görünüm şekillerde verilmiştir (Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).



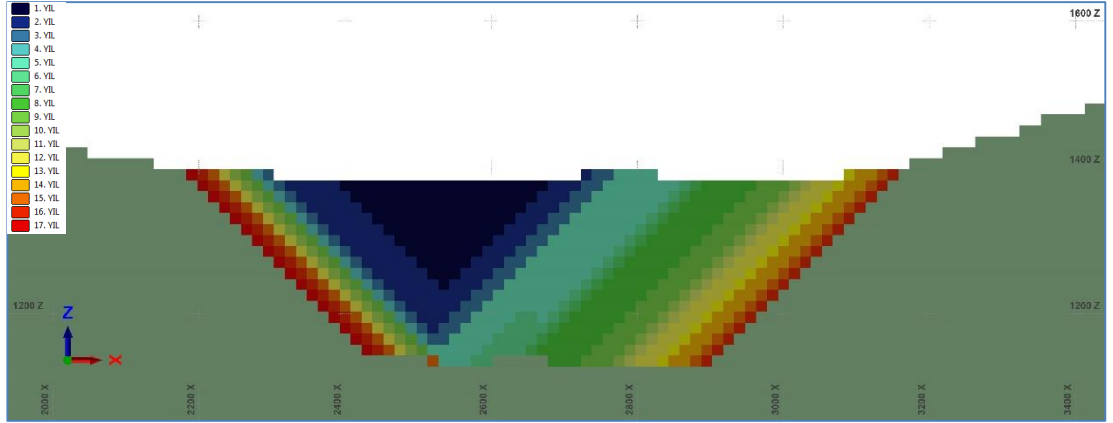
Şekil 4.17 : Gelir Ayarlama Faktörü – Üretim Miktarı grafiği.



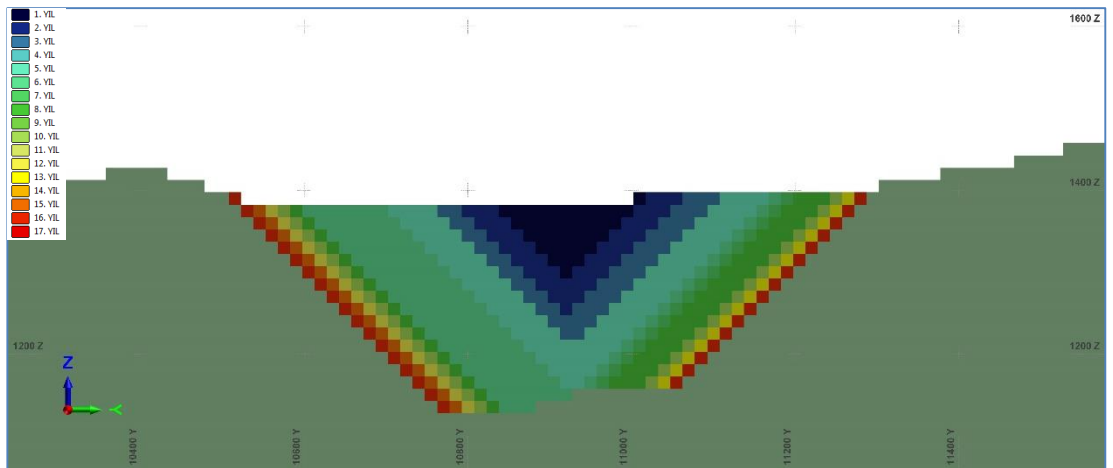
Şekil 4.18 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (Plan görünüm).



Şekil 4.19 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (GD görünümü).



Şekil 4.20 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (10900N kesiti).



Şekil 4.21 : İç içe ocaklar serisi ile elde edilen yıllık üretim (2610E kesiti).

En iyi durum senaryosunda iç içe ocaklar serisinde yer alan her bir ocak kendi içerisinde basamak basamak alınarak net bugünkü değerler hesaplanır. Bu yöntemde; net bugünkü değer maksimize edilmesine rağmen ocaklar arasındaki ilerlemenin az olduğu durumlarda (basamak oluşturmaya elverişli genişliğin bulunmaması) pratik olarak uygulanması mümkün olmayabilir.

Micromine içerisinde yer alan açık ocak optimizasyonu modülünde yıllık üretim kapasitesi kısıtı girilirken cevher ve dekapajın ton cinsinden toplamı kullanılmakta ve bu miktara göre üretim sıralaması elde edilmektedir. Yıllık üretim miktarı 15.000.000 ton olarak kabul edilmiştir. Belirlenen bu miktar ile ocağın ömrü yaklaşık 17 yıl olacaktır. Üretim miktarının belirlenmesi için herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Yıllık faiz oranı %10 ve ilk yatırım maliyeti 0 TL (sıfır) olarak kabul edilmiştir.

En iyi durum senaryosunda elde edilen sonuçlara göre; 17 yıllık üretim sonunda elde edilen 1.380.800.860 TL, %10 faiz ile iskonto edildiğinde net bugünkü değer 928.238.520 TL bulunmaktadır. Yıllara göre elde edilen kümülatif değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.5).

**Çizelge 4.5 : En iyi durum senaryosu analiz sonuçları.**

YIL	Cevher (m ³ )	Dekapaj (m ³ )	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Kümülatif Dekapaj Oranı (ton/ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	Kümülatif İskontolu Gelir (TL)	Kümülatif İskontolu Gider (TL)	NBD (TL)
1	1.130.625	1.896.750	4.522.500	5.690.250	1,26	10.212.750	184.623.951	15.174.000	169.449.951
2	2.203.875	3.607.875	8.815.500	10.823.625	1,24	19.639.125	420.513.164	42.062.748	378.450.417
3	1.866.375	2.511.000	7.465.500	7.533.000	1,16	14.998.500	543.561.141	58.678.608	484.882.533
4	205.875	408.375	823.500	1.225.125	1,17	2.048.625	559.714.871	61.151.080	498.563.790
5	3.381.750	3.948.750	13.527.000	11.846.250	1,06	25.373.250	703.765.568	83.849.623	619.915.945
6	2.301.750	2.774.250	9.207.000	8.322.750	1,02	17.529.750	782.041.035	97.842.998	684.198.038
7	442.125	607.500	1.768.500	1.822.500	1,03	3.591.000	797.150.424	100.601.467	696.548.957
8	2.608.875	3.702.375	10.435.500	11.107.125	1,03	21.542.625	883.930.881	116.620.252	767.310.629
9	2.089.125	3.111.750	8.356.500	9.335.250	1,04	17.691.750	944.925.676	128.555.856	816.369.820
10	1.771.875	3.172.500	7.087.500	9.517.500	1,07	16.605.000	992.007.345	139.458.688	852.548.656
11	1.167.750	2.041.875	4.671.000	6.125.625	1,09	10.796.625	1.015.354.169	145.800.680	869.553.488
12	1.981.125	3.898.125	7.924.500	11.694.375	1,12	19.618.875	1.051.134.464	157.002.306	894.132.158
13	1.279.125	3.354.750	5.116.500	10.064.250	1,17	15.180.750	1.073.535.407	165.573.233	907.962.174
14	1.211.625	3.128.625	4.846.500	9.385.875	1,21	14.232.375	1.089.984.845	172.832.210	917.152.635
15	972.000	3.128.625	3.888.000	9.385.875	1,26	13.273.875	1.102.696.212	179.470.055	923.226.158
16	843.750	3.786.750	3.375.000	11.360.250	1,33	14.735.250	1.114.059.945	186.851.260	927.208.685
17	583.875	3.088.125	2.335.500	9.264.375	1,39	11.599.875	1.120.605.038	192.366.518	928.238.520
<b>Toplam</b>	<b>26.041.500</b>	<b>48.168.000</b>	<b>104.166.000</b>	<b>144.504.000</b>		<b>248.670.000</b>			

En kötü durum senaryosunda ocağın tamamı basamak basamak üretilerek net bugünkü değer hesaplanır. Olabilecek en kötü kazı sıralaması durumunu temsil etmektedir. Bu analiz sonucu net bugünkü değer 362.397.352 TL hesaplanmıştır. Bu yöntemde göre yapılan analiz sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6 : En kötü durum senaryosu analiz sonuçları.**

YIL	Cevher (m ³ )	Dekapaj (m ³ )	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Kümülatif Dekapaj Oranı (ton/ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	Kümülatif İşkontolu Gelir (TL)	Kümülatif İşkontolu Gider (TL)	NBD (TL)
1	1.130.625	1.896.750	4.522.500	5.690.250	1,26	10.212.750	184.623.951	15.174.000	169.449.951
2	2.203.875	3.607.875	8.815.500	10.823.625	1,24	19.639.125	402.512.783	43.363.395	359.149.388
3	1.866.375	2.511.000	7.465.500	7.533.000	1,16	14.998.500	498.980.402	61.750.874	437.229.528
4	205.875	408.375	823.500	1.225.125	1,17	2.048.625	512.632.171	64.598.641	448.033.530
5	3.381.750	3.948.750	13.527.000	11.846.250	1,06	25.373.250	607.553.947	91.489.609	516.064.339
6	2.301.750	2.774.250	9.207.000	8.322.750	1,02	17.529.750	655.368.253	109.005.602	546.362.651
7	442.125	607.500	1.768.500	1.822.500	1,03	3.591.000	663.370.453	112.709.890	550.660.563
8	2.608.875	3.702.375	10.435.500	11.107.125	1,03	21.542.625	705.094.617	134.537.170	570.557.446
9	2.089.125	3.111.750	8.356.500	9.335.250	1,04	17.691.750	727.151.447	151.686.175	575.465.272
10	1.771.875	3.172.500	7.087.500	9.517.500	1,07	16.605.000	736.270.341	167.917.282	568.353.059
11	1.167.750	2.041.875	4.671.000	6.125.625	1,09	10.796.625	734.237.171	177.811.284	556.425.887
12	1.981.125	3.898.125	7.924.500	11.694.375	1,12	19.618.875	722.168.395	195.670.553	526.497.842
13	1.279.125	3.354.750	5.116.500	10.064.250	1,17	15.180.750	705.728.322	209.942.185	495.786.138
14	1.211.625	3.128.625	4.846.500	9.385.875	1,21	14.232.375	685.712.402	222.464.694	463.247.708
15	972.000	3.128.625	3.888.000	9.385.875	1,26	13.273.875	666.785.255	233.854.067	432.931.188
16	843.750	3.786.750	3.375.000	11.360.250	1,33	14.735.250	640.520.586	246.996.255	393.524.331
17	583.875	3.088.125	2.335.500	9.264.375	1,39	11.599.875	619.212.163	256.814.811	362.397.352
<b>Toplam</b>	<b>26.041.500</b>	<b>48.168.000</b>	<b>104.166.000</b>	<b>144.504.000</b>		<b>248.670.000</b>			

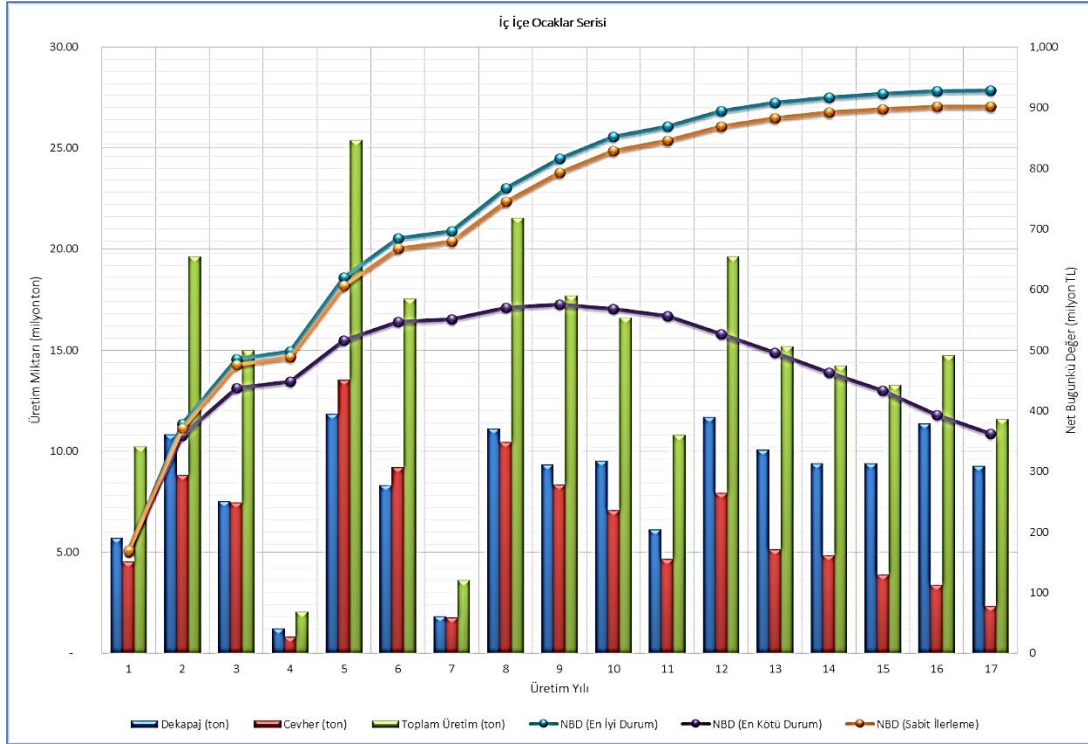
Sabit ilerleme senaryosu diğer bir adıyla Milawa Algoritması olarak bilinmektedir. Bu algoritma sayesinde en iyi durum senaryosunun vermiş olduğu sıralama net bugünkü değerden fedakârlık edilerek pratikte daha uygulanabilir hale getirilmektedir. Bu analiz sonucu net bugünkü değer 902.236.380 TL olarak belirlenmiştir. Milawa algoritması ile elde edilen analiz sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.7).

**Çizelge 4.7 : Sabit ilerleme senaryosu analiz sonuçları.**

YIL	Cevher (m ³ )	Dekapaj (m ³ )	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Kümülatif Dekapaj Oranı (ton/ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	Kümülatif İşkontolu Gelir (TL)	Kümülatif İşkontolu Gider (TL)	NBD (TL)
1	1.130.625	1.896.750	4.522.500	5.690.250	1,26	10.212.750	184.623.951	15.174.000	169.449.951
2	2.203.875	3.607.875	8.815.500	10.823.625	1,24	19.639.125	413.789.334	42.635.624	371.153.711
3	1.866.375	2.511.000	7.465.500	7.533.000	1,16	14.998.500	535.644.882	59.356.533	476.288.349
4	205.875	408.375	823.500	1.225.125	1,17	2.048.625	550.593.067	61.935.983	488.657.084
5	3.381.750	3.948.750	13.527.000	11.846.250	1,06	25.373.250	691.556.766	85.237.152	606.319.614
6	2.301.750	2.774.250	9.207.000	8.322.750	1,02	17.529.750	767.646.851	99.656.256	667.990.595
7	442.125	607.500	1.768.500	1.822.500	1,03	3.591.000	781.814.451	102.635.432	679.179.019
8	2.608.875	3.702.375	10.435.500	11.107.125	1,03	21.542.625	864.566.608	119.386.027	745.180.582
9	2.089.125	3.111.750	8.356.500	9.335.250	1,04	17.691.750	924.572.887	131.518.692	793.054.195
10	1.771.875	3.172.500	7.087.500	9.517.500	1,07	16.605.000	971.267.985	142.500.424	828.767.561
11	1.167.750	2.041.875	4.671.000	6.125.625	1,09	10.796.625	994.382.705	148.892.552	845.490.152
12	1.981.125	3.898.125	7.924.500	11.694.375	1,12	19.618.875	1.029.258.789	160.284.926	868.973.863
13	1.279.125	3.354.750	5.116.500	10.064.250	1,17	15.180.750	1.051.605.474	168.866.259	882.739.215
14	1.211.625	3.128.625	4.846.500	9.385.875	1,21	14.232.375	1.067.994.414	176.135.351	891.859.063
15	972.000	3.128.625	3.888.000	9.385.875	1,26	13.273.875	1.080.481.099	182.813.169	897.667.930
16	843.750	3.786.750	3.375.000	11.360.250	1,33	14.735.250	1.091.653.581	190.226.501	901.427.080
17	583.875	3.088.125	2.335.500	9.264.375	1,39	11.599.875	1.098.009.985	195.773.604	902.236.380
<b>Toplam</b>	<b>26.041.500</b>	<b>48.168.000</b>	<b>104.166.000</b>	<b>144.504.000</b>		<b>248.670.000</b>			

İç içe ocakların birleştirilmesiyle oluşan yıllık üretim miktarları ve bu üretim miktarlarının farklı kazı sıralamasını temsil eden üç farklı senaryodan elde edilen net bugünkü değerler aşağıdaki grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.22).

Micromine ile yapılan nihai sınırların bulunması, iç içe ocaklar serisinin elde edilmesi ve üç farklı senaryo ile yapılan analizler toplam 1 saat 24 dakika sürmüştür. Kullanılan bilgisayardaki işletim sistemi Windows7 Professional 64-bit, işlemci Intel i7-3370K @3.5 GHz ve RAM miktarı 32 GB'tır. Bu bilgisayarın ve işletim sisteminin özellikleri şekilde verilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.22 : Yıllık üretim miktarları ve üç farklı senaryoya göre NBD.

View basic information about your computer

Windows edition

Windows 7 Professional

Copyright © 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

Service Pack 1

System

Rating: **7.7** Windows Experience Index

Processor: Intel(R) Core(TM) i7-3770K CPU @ 3.50GHz 4.30 GHz

Installed memory (RAM): 32.0 GB

System type: 64-bit Operating System

Pen and Touch: No Pen or Touch Input is available for this Display

Computer name, domain, and workgroup settings

Computer name: PROJECTPC [Change settings](#)

Full computer name: PROJECTPC.maden.cc.itu.edu.tr

Computer description:

Workgroup: MADEN

Windows activation

Windows is activated

Product ID: 00371-868-0000007-85995 [Change product key](#)

ask for genuine Microsoft software

Learn more online...

Şekil 4.23 : Kullanılan bilgisayar ve işletim sistemi özellikleri.

#### 4.6 Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi İle Üretim Planlamasının Yapılması

Bu bölümde; bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan gelişmiş hareketli koni algoritması için kodlanmış program kullanılarak üretim planlaması yapılmıştır. Üretim sıralaması ve açık ocak nihai sınırlarının eş zamanlı olarak bulunması için bir önceki bölümde yer alan blok model kullanılmıştır. Blok model ve blok model içerisinde yer alan ekonomik değerler tamamen aynıdır. Böylece geliştirilen yöntemin avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmış olacaktır.

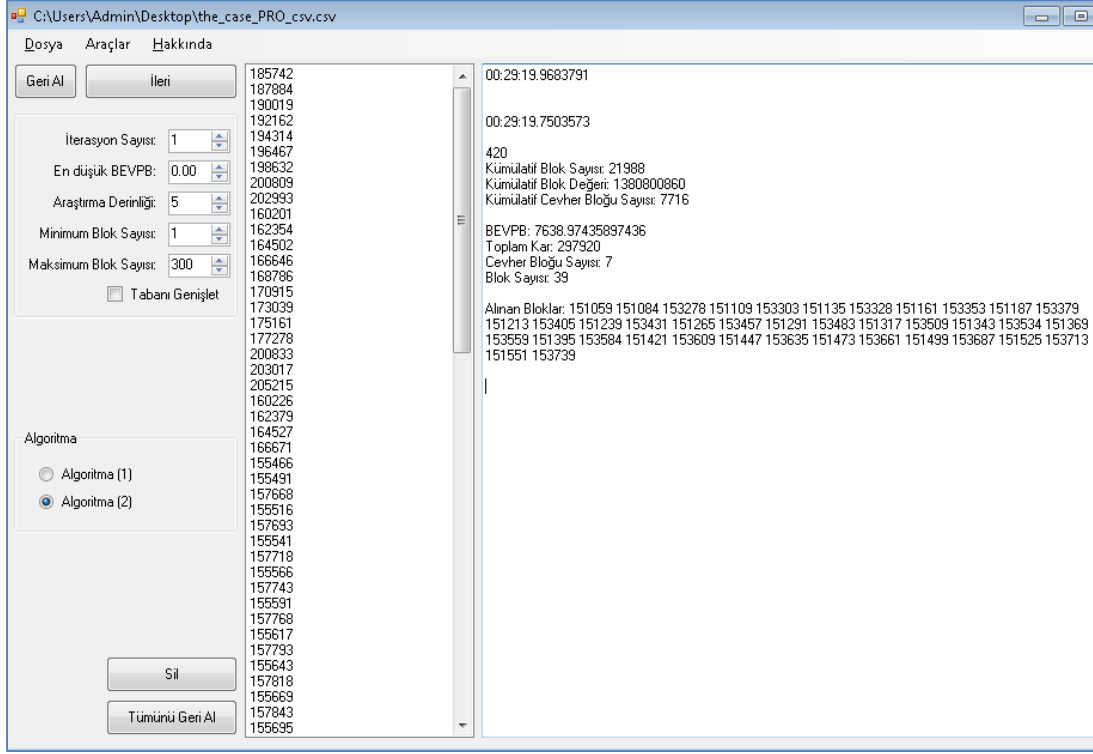
Öncelikle daha önce kullanılmış olan blok model dosyası, program tarafından içe aktarılmıştır. Ardından her iterasyonda kaç blok alınması gerektiği programa girilmiştir. Daha sonra maksimum blok sayısı girilerek her iterasyonda alınabilecek maksimum blok sayısı belirlenmiştir. Buradaki maksimum blok sayısı yıllık üretim miktarı olmak zorunda değildir. Algoritma ile yapılan analiz sonlandığında iterasyon sonuçlarından elde edilen blok kümelerinin birleştirilmesiyle yıllık üretim miktarına ulaşılabilir.

Bu örnek için maksimum blok sayısı 200 olarak seçilmiştir. Böylece her iterasyonda alınabilecek maksimum blok sayısı 200 olacak ve her bir bloğun  $3.375 \text{ m}^3$  olduğu düşünüldüğünde alınabilecek maksimum hacim miktarı  $200(\text{blok}) \times 3.375(\text{m}^3/\text{blok}) = 675.000 \text{ m}^3$  olacaktır. Bir iterasyonda elde edilebilecek minimum hacim ise  $3.375 \text{ m}^3$ 'lük tek bloktan oluşur.

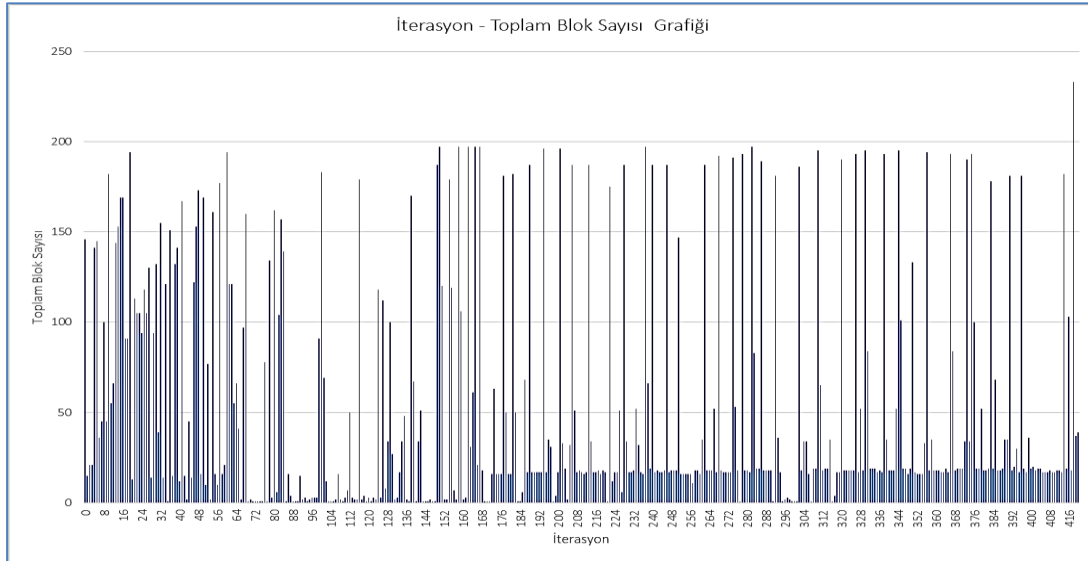
Programdaki ayarlardan biri de maksimum kazı derinliğidir. Bu özellik sayesinde her iterasyonda alınan blokların derinliği sınırlandırılmış olur. Bu örnek için maksimum derinlik 5 blok seçilmiştir. Blokların yüksekliği 15m olduğundan dolayı; her iterasyonda incelenen blokların yüzeyden derinliği maksimum  $5(\text{blok}) \times 15(\text{m/blok}) = 75 \text{ m}$  olacaktır. Program ayarları yapıldıktan sonra çalıştırıldığında; her iterasyonda birim blok kazısı başına düşen ekonomik değeri (BEVPB) en yüksek olan blok kümesi bulunacak ve log dosyasına kaydedilecektir.

İterasyon sayısı 418'e ulaştığında pozitif değerli blok kümesi bulunamamış ve iterasyonlar sona ermiştir. Burada maksimum blok sayısı 300 yapılarak iterasyona devam edilmiştir. İterasyon sayısı 421 olduğunda yine pozitif değerli blok kümesi bulunamamıştır. Bu nedenle tekrar maksimum blok sayısı kısıtı arttırılmış ve koni taban genişliği arttırılmıştır. Ancak 421. iterasyondan sonra herhangi bir pozitif değerli blok kümesi bulunamadığı için optimum değere ulaşılmış ve iterasyonlar sona

endirilmiştir. 421 iterasyon için işlem zamanı 21 saattir. Uygulanmış olan 421 iterasyon sonucunda örnekteki açık ocak için üretim sıralaması yapılmış ve nihai sınırlara ulaşılmıştır. İterasyonların sona ermesinin ardından program ekranındaki görünüm şekilde verilmiştir (Şekil 4.24). Aşağıdaki grafikte her iterasyonda alınan blok sayıları yer almaktadır (Şekil 4.25).

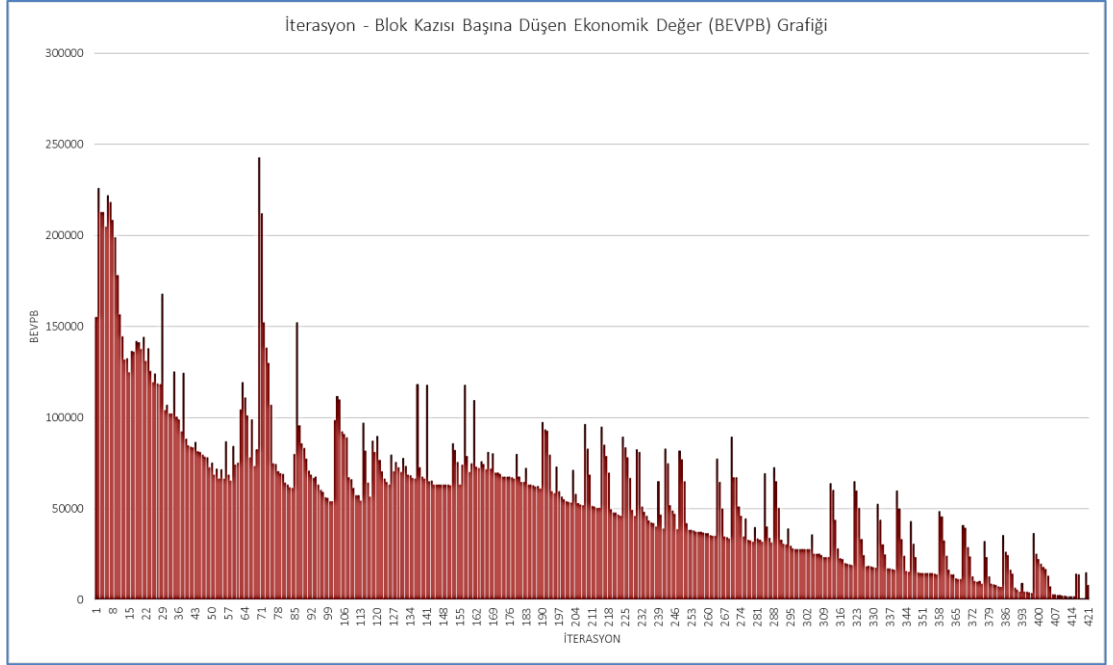


Şekil 4.24 : İterasyonların sonunda programın görünümü.



Şekil 4.25 : Gelişmiş hareketli koni iterasyonları ve blok sayıları.

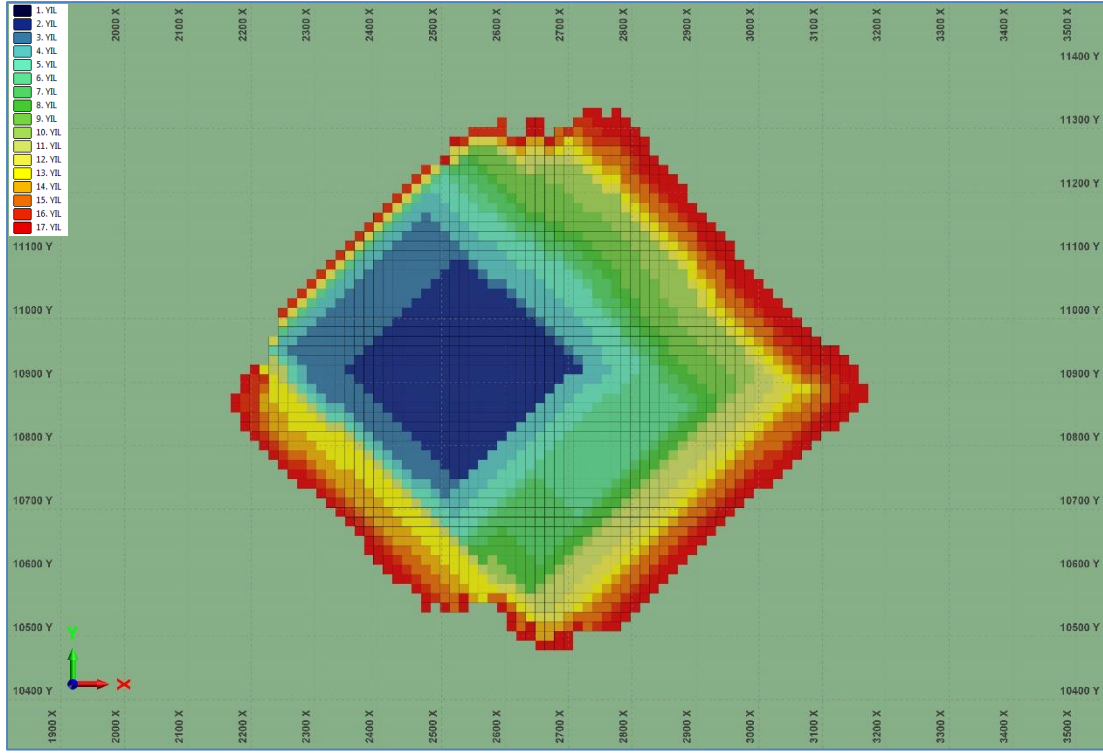
Her iterasyonda elde edilen, birim blok kazısı başına düşen ekonomik değer (BEVPB) grafiği aşağıdaki şekilde verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi ocağın ilk yıllarında birim hacim kazısı ile daha çok kazanç elde edilmiştir. Ocak ömrü sonuna doğru ise bu değerler azalmaktadır.



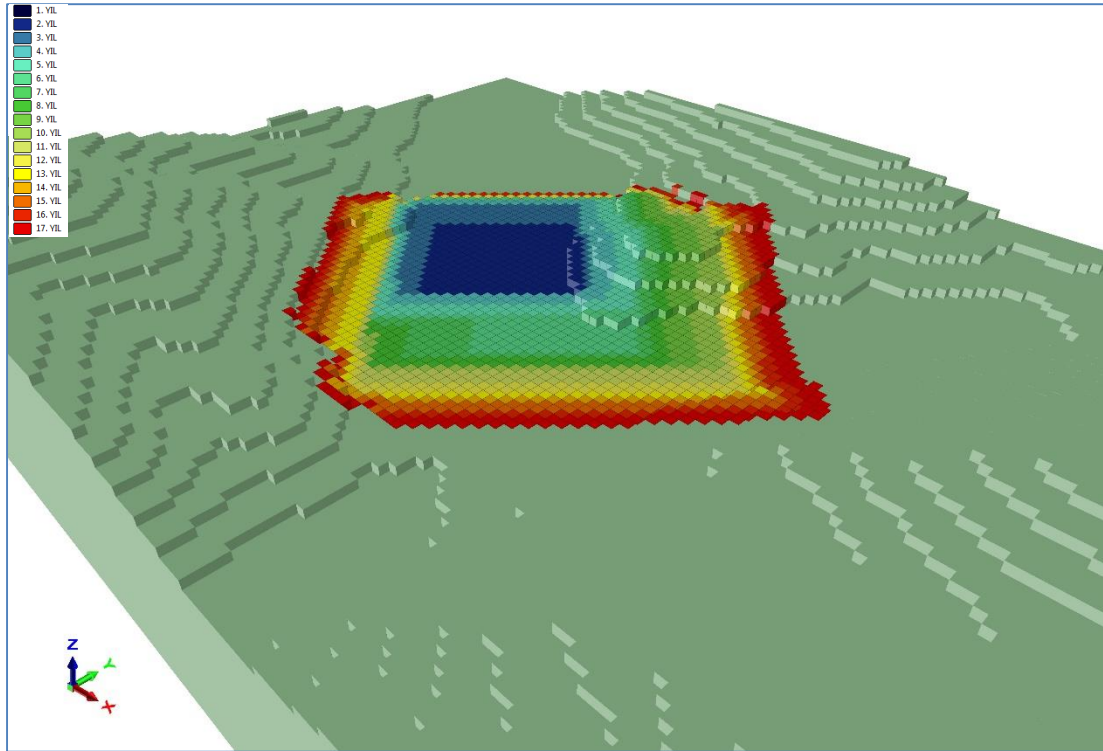
**Şekil 4.26 : İterasyonlar ve BEVPB değerleri.**

Gelişmiş hareketli koni algoritması ile elde edilen üretim sıralaması aynı zamanda açık ocak nihai sınırlarını da vermektedir. Elde edilen nihai sınırlar Lerchs ve Grossmann algoritmasının verdiği sonuçlar ile aynı olmuştur (Çizelge 4.3). Bu sınırlar içerisinde 104.166.000 ton (26.041.500 m³) cevher ve 144.504.000 ton (48.168.000 m³) dekapaj bulunmaktadır. Ocağın toplam hacmi 74.209.500 m³ toplam tonajı ise 248.670.000 ton'dur. Ocak nihai sınırlarına erişildiğinde elde edilecek toplam kazanç 1.380.800.860 TL olarak bulunmuştur.

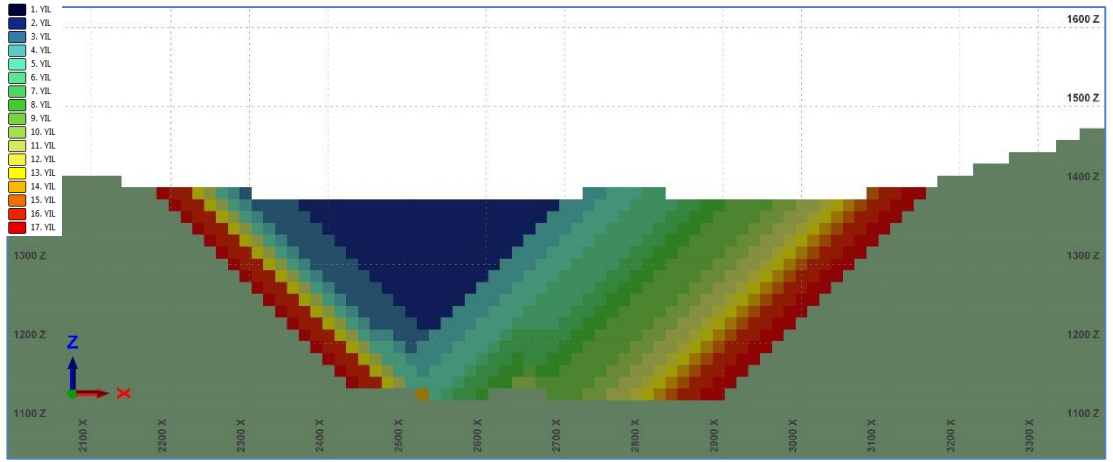
Elde edilen düzensiz üretim miktarlarının yıllık üretim miktarlarına göre birleştirilmesi gerekmektedir. Bu birleştirme işlemi ile yıllık üretim miktarlarına yakın gruplar oluşturulur. Bu işlem sonucu; kazı başlangıcının yapılacağı yer ve yıllara göre kazılacak olan bloklar elde edilmiştir (Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30).



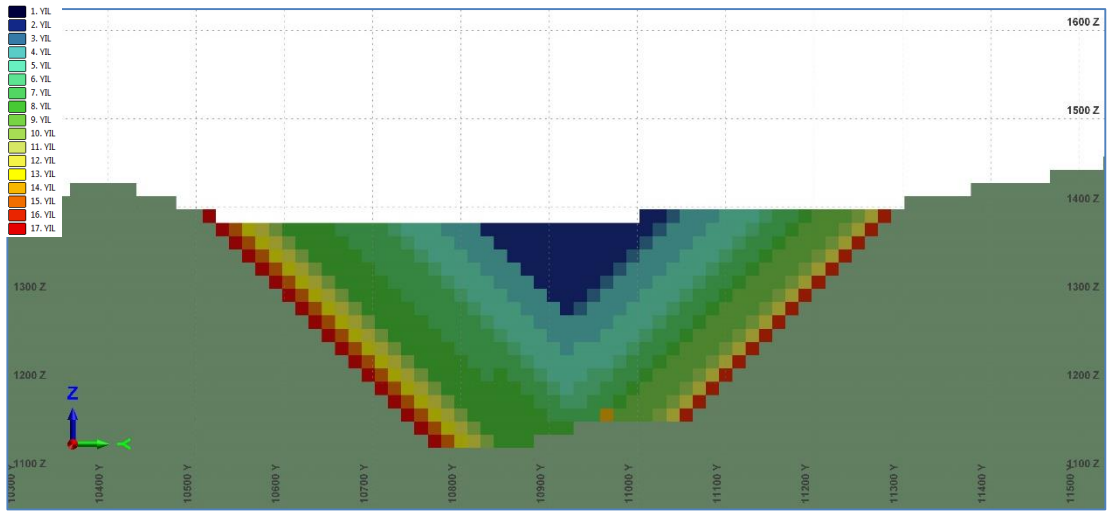
Şekil 4.27 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (Plan görünüm).



Şekil 4.28 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (GD görünümü).



**Şekil 4.29 :** Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (10900N kesiti).



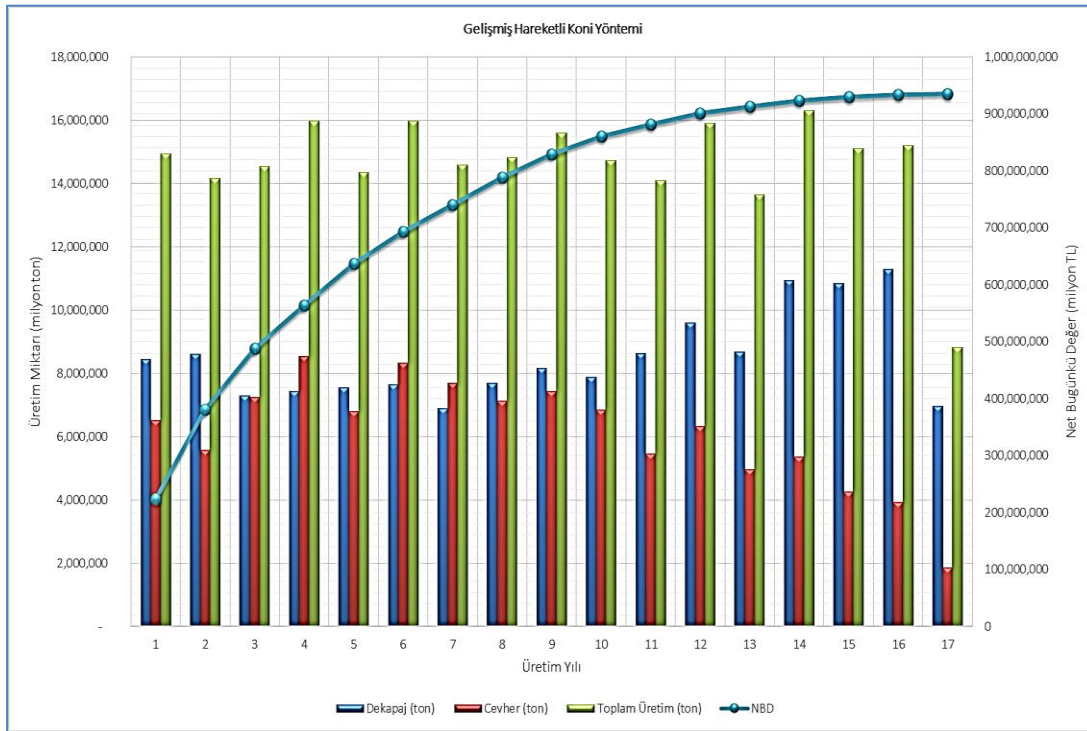
**Şekil 4.30 :** Gelişmiş hareketli koni yıllık üretimleri (2610E kesiti).

Yıllık üretim miktarlarının elde edilmesiyle hangi blok kümesinin hangi zamanda çıkarılacağı belirlenmiş olur. Böylece paranın zaman değeri hesaba katılabilir. Algoritma sonucu elde edilen kazı sıralamasına göre net bugünkü değer 934.557.426 TL bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Yıllara göre elde edilen üretim miktarları ve net bugünkü değerlerin hesaplanmasıyla elde edilen grafik aşağıda verilmiştir (Şekil 4.31). Bu grafikte yıllık 15.000.000 ton (cevher + dekapaj) üretim hedefiyle gelişmiş hareketli koni yöntemi kullanıldığında elde edilen üretim miktarları görülmektedir.

**Çizelge 4.8 : Gelişmiş hareketli koni yıllık üretim miktarları.**

YIL	Cevher (m³)	Dekapaj (m³)	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Kümülatif Ocak (m³)	Kümülatif Ocak (ton)	NBD (TL)
1	1.626.750	2.811.375	6.507.000	8.434.125	4.438.125	14.941.125	224.208.495
2	1.390.500	2.868.750	5.562.000	8.606.250	8.697.375	29.109.375	380.640.158
3	1.809.000	2.430.000	7.236.000	7.290.000	12.936.375	43.635.375	488.078.166
4	2.133.000	2.477.250	8.532.000	7.431.750	17.546.625	59.599.125	564.099.722
5	1.697.625	2.517.750	6.790.500	7.553.250	21.762.000	73.942.875	636.642.065
6	2.079.000	2.551.500	8.316.000	7.654.500	26.392.500	89.913.375	692.767.269
7	1.923.750	2.298.375	7.695.000	6.895.125	30.614.625	104.503.500	740.512.731
8	1.782.000	2.565.000	7.128.000	7.695.000	34.961.625	119.326.500	788.501.735
9	1.859.625	2.720.250	7.438.500	8.160.750	39.541.500	134.925.750	828.647.808
10	1.711.125	2.625.750	6.844.500	7.877.250	43.878.375	149.647.500	860.158.364
11	1.363.500	2.875.500	5.454.000	8.626.500	48.117.375	163.728.000	881.308.586
12	1.579.500	3.196.125	6.318.000	9.588.375	52.893.000	179.634.375	900.650.471
13	1.238.625	2.892.375	4.954.500	8.677.125	57.024.000	193.266.000	913.050.272
14	1.339.875	3.645.000	5.359.500	10.935.000	62.008.875	209.560.500	922.948.997
15	1.063.125	3.614.625	4.252.500	10.843.875	66.686.625	224.656.875	929.911.562
16	978.750	3.759.750	3.915.000	11.279.250	71.425.125	239.851.125	933.777.103
17	465.750	2.318.625	1.863.000	6.955.875	74.209.500	248.670.000	934.557.426
	26.041.500	48.168.000	104.166.000	144.504.000			



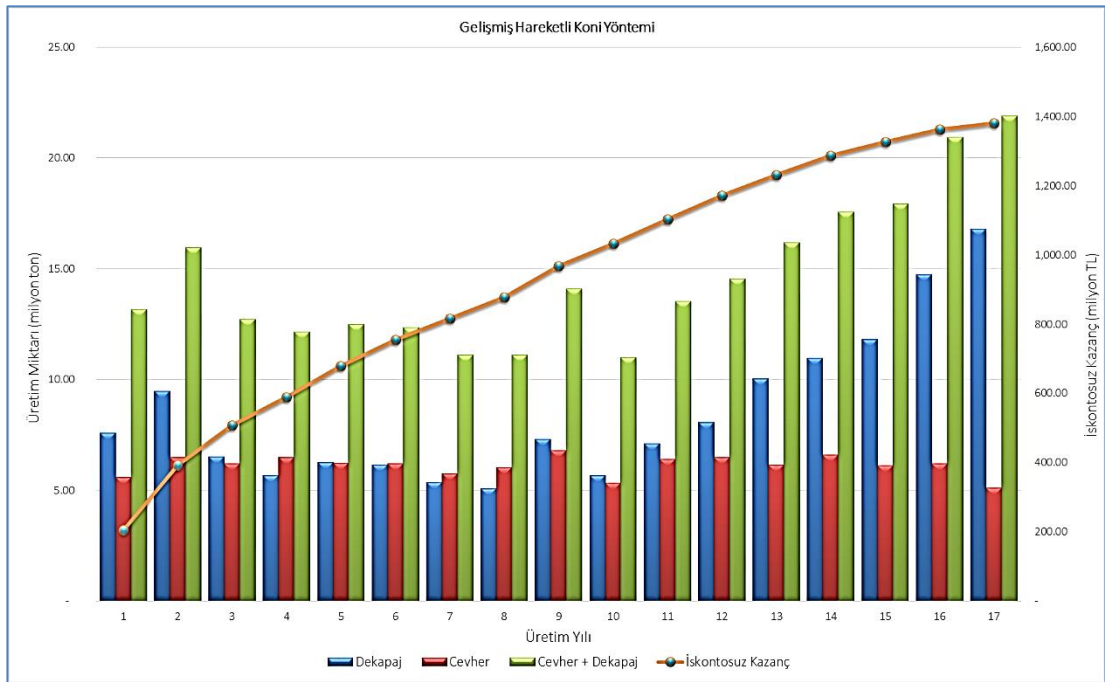
**Şekil 4.31 : Yıllık üretim miktarları ve NBD grafiği.**

Eğer üretim sıralaması, toplam kazılan malzemeye (cevher + dekapaj) göre değil de yıllık cevher üretim miktarına göre yapılmak istenilirse; böyle bir durumda iterasyonlardan elde edilen cevher miktarları göz önünde bulundurularak gruplandırma yapılması gerekir. Örnekte yer alan ocak ömrünün 17 yıl olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yıllık cevher üretimi yaklaşık olarak 6.200.000 ton kabul edilebilir. Böyle bir durumda, her yıl için yaklaşık olarak 6.200.000 ton cevher kazılacak ve dekapaj miktarı ise değişkenlik gösterecektir. Cevher üretim miktarına göre yapılan gruplandırma sonucu aşağıdaki tablo (Çizelge 4.9) ve şekil (Şekil 4.32)

elde edilmiştir. Bu şekil ve tabloda üretim miktarlarına göre kümülatif iskontosuz kazanç görülebilmektedir. Diğer yöntemle karşılaştırma yapılamayacağı için net bugünkü değerler hesaplanmamıştır.

**Çizelge 4.9 : Yıllık cevher ihtiyacına göre üretim miktarları ve kümülatif kazanç.**

Üretim Yılı	Dekapaj (ton)	Cevher (ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	Kümülatif Iskontosuz Kazanç (TL)
1	7,573,500	5,589,000	13,162,500	205,125,018
2	9,466,875	6,480,000	15,946,875	392,659,192
3	6,520,500	6,196,500	12,717,000	507,751,746
4	5,659,875	6,480,000	12,139,875	588,320,381
5	6,257,250	6,237,000	12,494,250	678,355,819
6	6,145,875	6,196,500	12,342,375	754,656,853
6	5,346,000	5,764,500	11,110,500	815,600,077
7	5,072,625	6,034,500	11,107,125	877,897,607
8	7,300,125	6,804,000	14,104,125	966,717,602
9	5,659,875	5,332,500	10,992,375	1,031,838,670
10	7,117,875	6,412,500	13,530,375	1,103,251,696
11	8,049,375	6,480,000	14,529,375	1,170,423,907
12	10,023,750	6,142,500	16,166,250	1,231,136,797
13	10,975,500	6,588,000	17,563,500	1,285,989,499
14	11,805,750	6,129,000	17,934,750	1,327,049,599
16	14,742,000	6,196,500	20,938,500	1,362,774,920
17	16,787,250	5,103,000	21,890,250	1,380,800,860
	144,504,000	104,166,000	248,670,000	



**Şekil 4.32 : Yıllık cevher ihtiyacına göre üretim miktarları ve kümülatif kazanç.**

Yukarıdaki grafik ve şekilden de görüleceği üzere gelişmiş hareketli koni yöntemi, yıllık cevher üretim miktarı ihtiyaçlarını da karşılayabilecek blok kümeleri elde edebilmektedir. Bunun için iterasyonlardan elde edilen blok kümelerinin, cevher ihtiyacına göre gruplandırılması yeterlidir. Yazılımın tekrar çalıştırılıp iterasyonlardan

elde edilen blok kümelerinin cevher miktarlarına göre belirlenmesine gereksinim duyulmamaktadır.

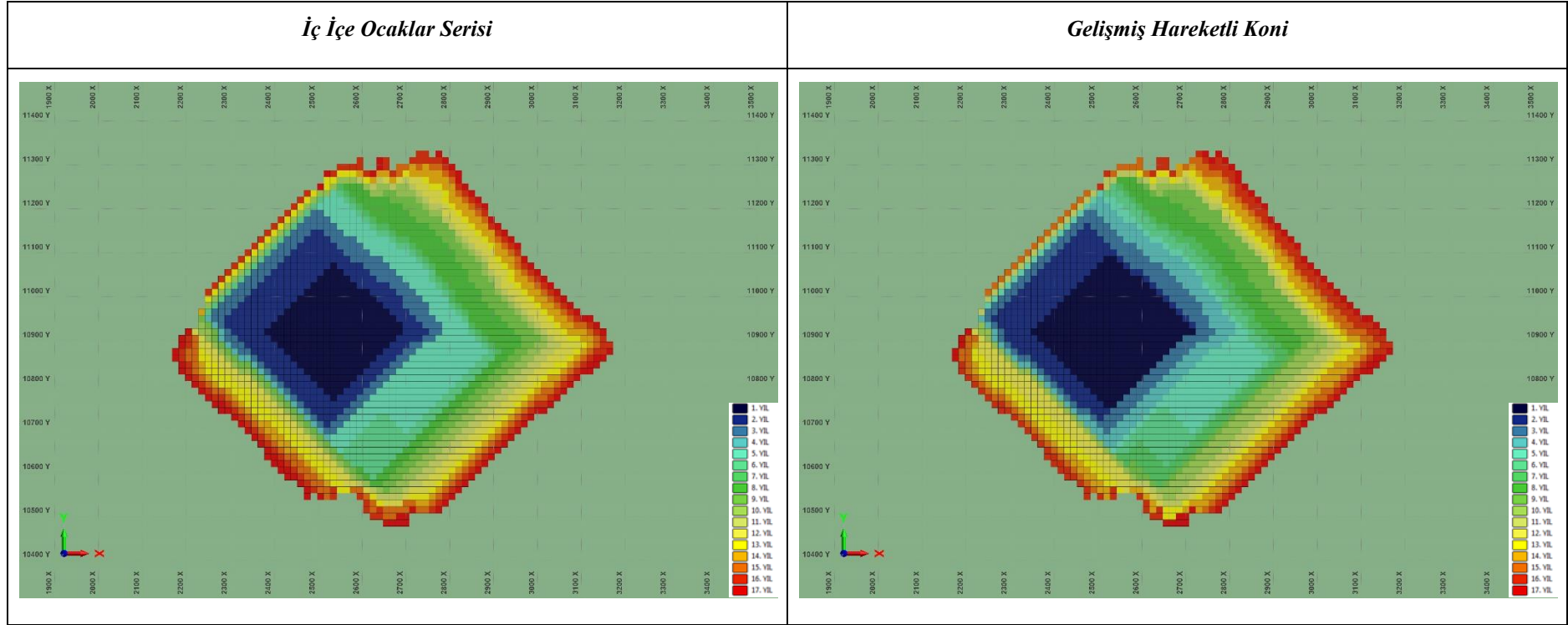
#### 4.7 Sonuçların Değerlendirilmesi

Hipotetik bir saha üzerinde yapılan üretim planlaması sonuçlarına bakıldığında gelişmiş hareketli koni algoritması açık ocak nihai sınırlarını bulma konusunda Lerchs ve Grossmann algoritması ile aynı optimum sonuçları vermektedir. Üretim sıralaması konusunda ise iç içe ocaklar serisi yöntemiyle elde edilen ve ardından en iyi durum senaryosuyla hesaplanan net bugünkü değerin daha da üzerine çıkabileceği görülmüştür. Elde edilen toplu sonuçlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 4.10). Görsel olarak karşılaştırma yapılabilmesi için bir araya getirilen görüntüler aşağıdaki şekilde yer almaktadır (Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36). Net bugünkü değerin diğer yöntemle göre daha yüksek çıkmasının haricinde yıllık üretim miktarı hedeflerinin daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçların özeti aşağıdaki tabloda verilmiştir (Çizelge 4.11). Bu tablodan elde edilen grafikte de görüldüğü gibi üretim miktarlarındaki sapmalar kabul edilebilir boyutlardadır (Şekil 4.37).

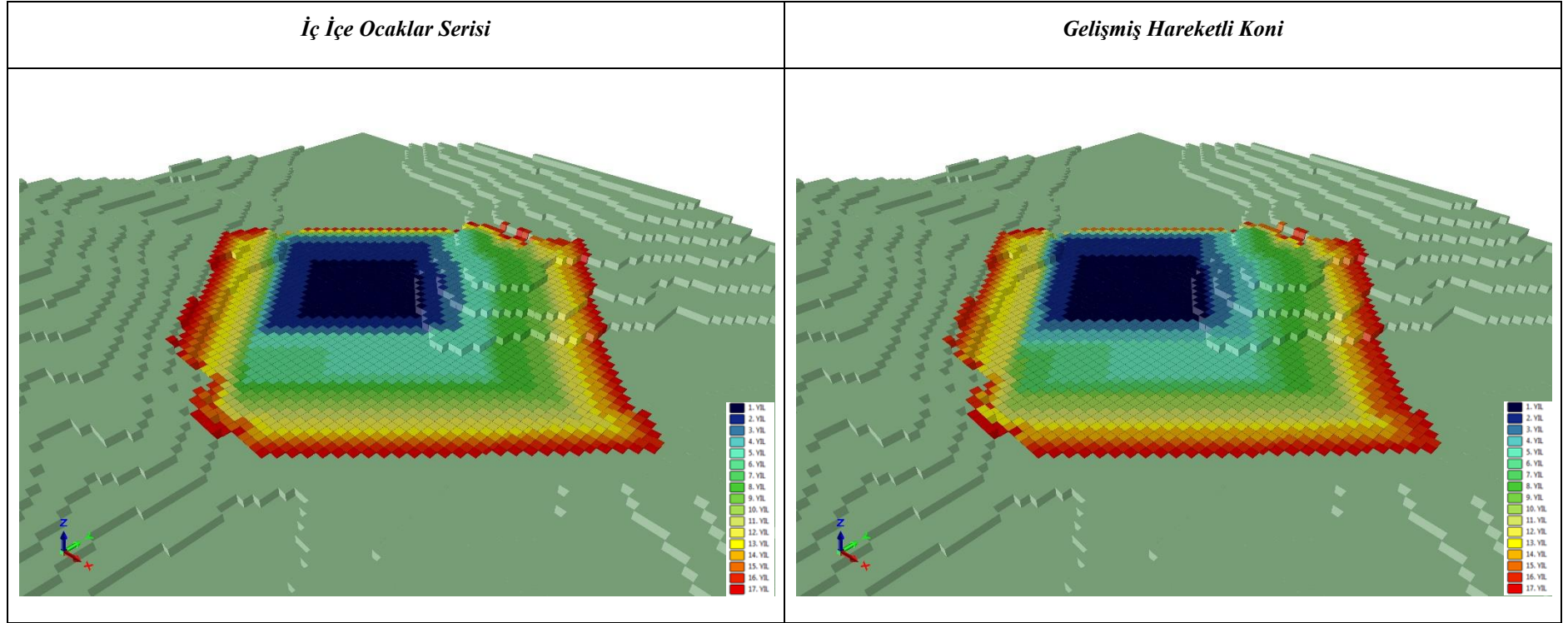
**Çizelge 4.10 : Sonuçların karşılaştırılması.**

Yöntem	Üretim Miktarları (ton)			Dekapaj Oranı (ton/ton)	İskontosuz Kazanç (TL)	Net Bugünkü Değer (TL)
	Cevher	Dekapaj	Cevher + Dekapaj			
<i>LG &amp; En İyi Durum Senaryosu</i>	104.166.000	144.504.000	248.670.000	1,39	1.380.800.860	928.238.520
<i>LG &amp; En Kötü Durum Senaryosu</i>						362.397.352
<i>LG &amp; Sabit İlerleme Senaryosu (Milawa Algoritması)</i>						902.236.380
<i>Gelişmiş Hareketli Koni</i>						934.557.426

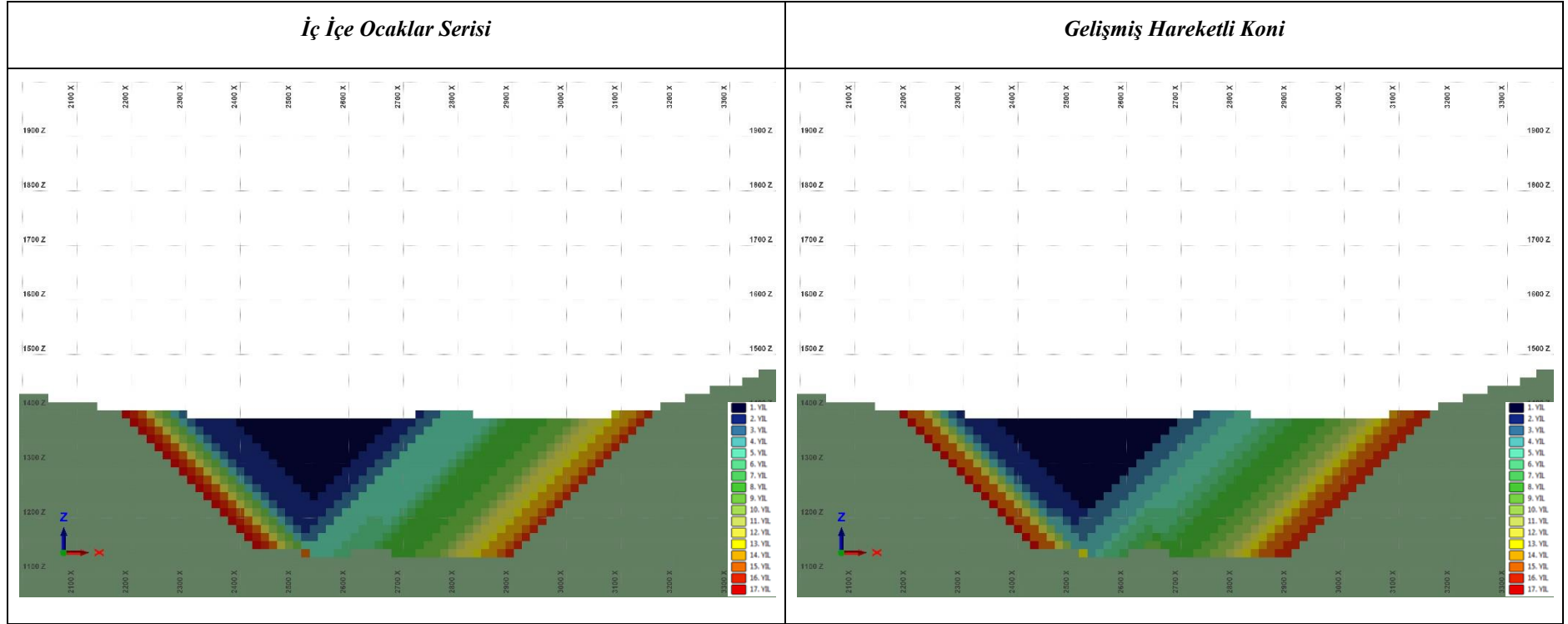
Sonuç olarak; geliştirilen yöntemin (Gelişmiş Hareketli Koni) açık ocak nihai sınırlarının ve üretim sıralamasının optimizasyonunda alternatif olarak kullanılabilecek bir yöntem olduğu düşünülmektedir.



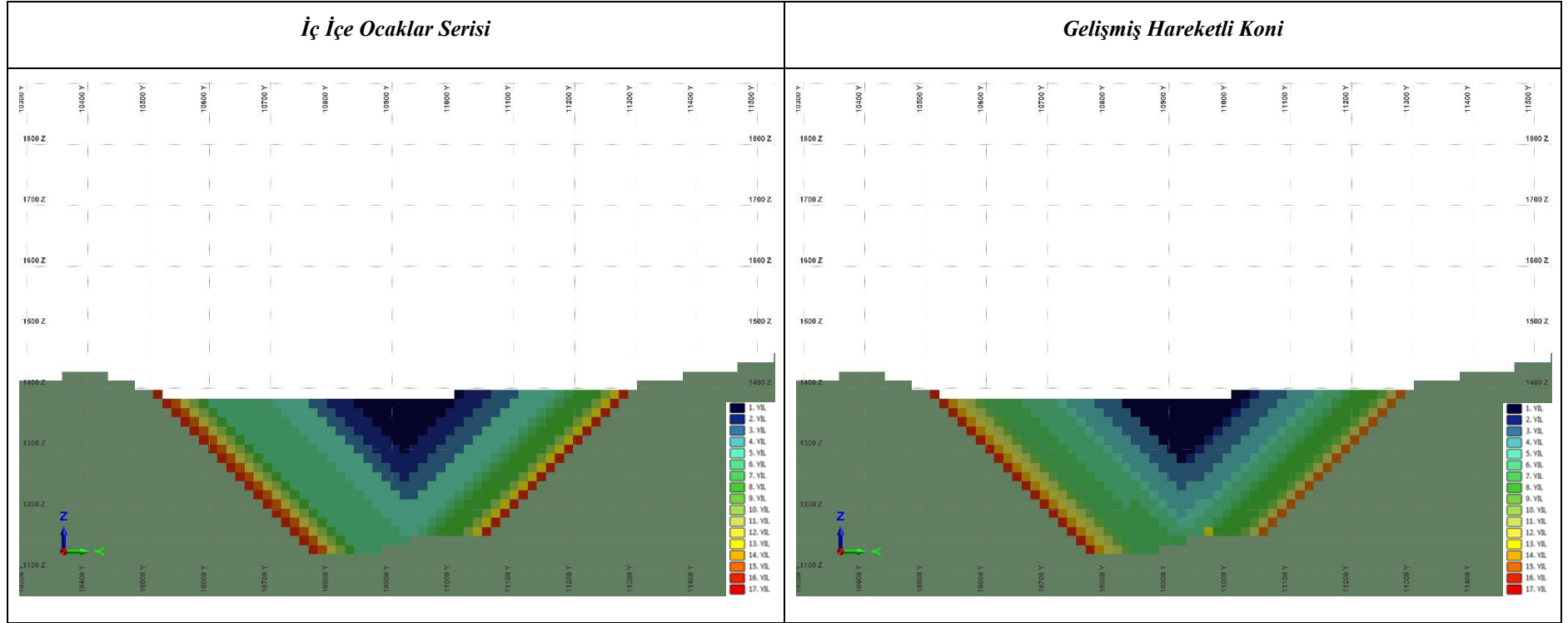
Şekil 4.33 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (Plan görünüm).



Şekil 4.34 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (GD görünümü).



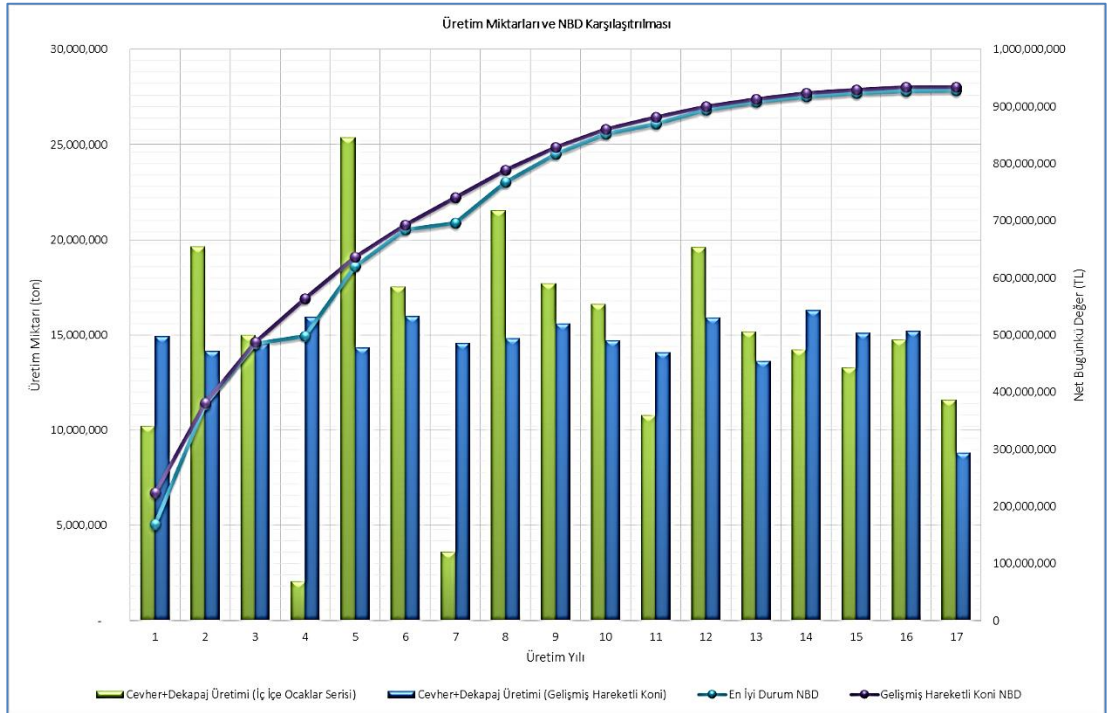
Şekil 4.35 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (10900N kesiti).



Şekil 4.36 : Sonuçların görsel olarak karşılaştırılması (2610E kesiti).

**Çizelge 4.11 : Üretim miktarı ve NBD sonuçlarının karşılaştırılması.**

YIL	İç İçe Ocaklar Serisi (En İyi Durum Senaryosu)				Gelişmiş Hareketli Koni			
	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	NBD (TL)	Cevher (ton)	Dekapaj (ton)	Cevher + Dekapaj (ton)	NBD (TL)
1	4.522.500	5.690.250	10.212.750	169.449.951	6.507.000	8.434.125	14.941.125	224.208.495
2	8.815.500	10.823.625	19.639.125	378.450.417	5.562.000	8.606.250	14.168.250	380.640.158
3	7.465.500	7.533.000	14.998.500	484.882.533	7.236.000	7.290.000	14.526.000	488.078.166
4	823.500	1.225.125	2.048.625	498.563.790	8.532.000	7.431.750	15.963.750	564.099.722
5	13.527.000	11.846.250	25.373.250	619.915.945	6.790.500	7.553.250	14.343.750	636.642.065
6	9.207.000	8.322.750	17.529.750	684.198.038	8.316.000	7.654.500	15.970.500	692.767.269
7	1.768.500	1.822.500	3.591.000	696.548.957	7.695.000	6.895.125	14.590.125	740.512.731
8	10.435.500	11.107.125	21.542.625	767.310.629	7.128.000	7.695.000	14.823.000	788.501.735
9	8.356.500	9.335.250	17.691.750	816.369.820	7.438.500	8.160.750	15.599.250	828.647.808
10	7.087.500	9.517.500	16.605.000	852.548.656	6.844.500	7.877.250	14.721.750	860.158.364
11	4.671.000	6.125.625	10.796.625	869.553.488	5.454.000	8.626.500	14.080.500	881.308.586
12	7.924.500	11.694.375	19.618.875	894.132.158	6.318.000	9.588.375	15.906.375	900.650.471
13	5.116.500	10.064.250	15.180.750	907.962.174	4.954.500	8.677.125	13.631.625	913.050.272
14	4.846.500	9.385.875	14.232.375	917.152.635	5.359.500	10.935.000	16.294.500	922.948.997
15	3.888.000	9.385.875	13.273.875	923.226.158	4.252.500	10.843.875	15.096.375	929.911.562
16	3.375.000	11.360.250	14.735.250	927.208.685	3.915.000	11.279.250	15.194.250	933.777.103
17	2.335.500	9.264.375	11.599.875	928.238.520	1.863.000	6.955.875	8.818.875	934.557.426
<b>Toplam</b>	<b>104.166.000</b>	<b>144.504.000</b>	<b>248.670.000</b>		<b>104.166.000</b>	<b>144.504.000</b>	<b>248.670.000</b>	



**Şekil 4.37 : Üretim miktarı ve NBD sonuçlarının karşılaştırılması.**



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Açık ocak işletmelerinde üretim planlaması; ocağın başlangıcından ömrünün sonuna kadar süren, bu süreç içerisinde optimize edilmesi ve karar verilmesi gereken birçok değişkeni olan bir planlama sürecidir. Üretim planlamasının ana amacı, fiziksel ve ekonomik koşullar altında ocaktan elde edilecek ekonomik değerin maksimize edilmesidir. Ekonomik değerin maksimizasyonunun belirlenmesinde ise açık ocağın nihai sınırları ve üretim sıralaması oldukça etkilidir.

Açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesi, kazancı maksimize etmek amacıyla yapılan önemli bir optimizasyon işlemidir. Bu adımın esas amacı, açık ocak nihai sınırlarının iskontosuz kazancın maksimize edildiği yere kadar getirilmesidir. Nihai sınırları belirleme konusunda en güvenilir yöntemler Lerchs-Grossmann algoritması ile Maksimum Akış algoritmasıdır. Hareketli Koni yöntemi ise kolay anlaşılması ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilebilmektedir.

Açık ocak işletmelerinde üretim sıralaması veya kazı sıralaması ise hangi malzemenin ne zaman kazılacağı ile ilgilidir. Üretim sıralaması optimize edilirken ocaktan elde edilen net bugünkü değerin (NBD) diğer bir deyişle iskontolu kazancın maksimize edilmesi için uğraşılır. Üretim sıralamasında, net bugünkü değerin maksimize edilmeye çalışılmasının nedeni ekonomik değişkenlerin zamana göre değişiyor olması yani paranın zaman değeridir. Üretim sıralamasının optimize edilmesi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem parametreleştirme tekniği ile elde edilen iç içe ocaklar serisinin oluşturulmasıdır.

Optimum kazı sıralamasını belirleyerek yapılan kazı ile gelişigüzel yapılmış bir kazı arasında milyonlarca lira kazanç farkı olması muhtemeldir ve bu kazı sıralamasının belirlenmesi yoğun hesaplar içeren bir süreçtir. Bu sürecin veya çözüm zamanının kısaltılması için birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Ancak bunların çoğu optimum sonucu verememektedir. Çözümü garanti etmeye yönelik diğer çalışmalar ise maliyetli ve kullanışsız olduğu gibi optimum çözüme ulaşılması bazen günler

sürebilmektedir. Bu da kullanıcıya parametreleri değiştirebilmesi esnekliğini kaybettirmektedir.

Açık ocak işletmelerinde üretim planlamasının optimizasyonu amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle, açık ocak nihai sınırları öncelikli olarak tespit edilmekte ve daha sonra bu sınırlar içerisinde üretim sıralaması yapılmaktadır. Ancak, nihai sınırlar elde edilirken kullanılan blok ekonomik değerlerinin şimdiki zamana göre alınması ve bu blokların gerçekte çıkarılacağı zamandaki değerlerinin hesaba katılmaması nedeniyle bu sınırların gerçekten de optimum olduğu tartışma konusudur. Bu nedenle araştırmacılar, açık ocak nihai sınırları ve üretim sıralamasını eş zamanlı olarak optimize edebilen yöntemlerin geliştirilmesi için uğraşmaktadırlar. Bu yöntemlerde; hangi malzemenin hangi zamanda çıkarılacağı belli olduğundan dolayı, çıkarılış zamanına göre ekonomik değerler verilebilmektedir. Bu durumda paranın zaman değeri de hesaba katılmış olur.

Açık işletmelerde üretim planlaması konusunda şu ana kadar yapılan birçok çalışma mevcuttur. Ancak bu çalışmalarda yer alan aşağıdaki gibi bir veya birkaç farklı genel problem dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır;

- Üretim sıralaması ve nihai sınırların eş zamanlı olarak incelenememesi
- Bloklara verilen şimdiki zaman değerleri ile nihai sınırların bulunması diğer bir deyişle paranın zaman değerinin hesaba katılmaması
- Sınır tenör değerinin sabit olarak kabul edilmesi
- Şev açılarının bazı yöntemlerde uygulanabilme zorluğu
- Büyük çaptaki maden yataklarında blokların çok olmasından dolayı işlem zamanının çok fazla olması
- Belirlenen kazı sıralamasında yer alan iç içe ocaklar serisindeki üretim miktarlarının, kapasite açısından birbirinden çok farklı olabilmesi (aralık problemi (gap problem))

Bu doktora tezi kapsamında açık ocak işletmelerinde uzun vadeli üretim planlaması üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalara alternatif olabilecek bir algoritma geliştirilmiştir. Tezin amacı, açık ocaklarda net bugünkü değer in maksimizasyonunu sağlayacak üretim sıralamasının elde edilmesi ve aynı zamanda açık ocak nihai sınırlarının bulunmasıdır. Bu amaçla bir algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen algoritmada hedef; bloklara net bugünkü değerlerin girilmesinden ziyade bu değeri belirleyen değişkenlerden faydalanarak net bugünkü değeri maksimize edebilecek sıralamanın belirlenmesi yönündedir. Bunun için; blok ekonomik değerleri ve kazı miktarı değişkenleri göz önünde bulundurularak birim hacim kazısı başına elde edilen ekonomik kazancın maksimize edilmesi yoluna gidilmiştir. Kazı sıralamasında istenilen blok kümelerinin bulunabilmesi için de hareketli koni yönteminden faydalanılmıştır. Geliştirilen yöntemin çalışma içerisinde belirtilebilmesi için “Gelişmiş Hareketli Koni Yöntemi” ismi verilmiştir.

Geliştirilen algoritma; ekonomik değerleri girilmiş olan blok model üzerinde çalışmaktadır. Her iterasyonda, birim hacim başına düşen ekonomik değer maksimum olduğu ve yıllık üretim kapasitesini geçmeyen blok kümeleri bulunup blok modelden çıkarılmaktadır. Bu blok kümeleri aranırken pozitif koni kullanılmaktadır. Pozitif koni ile elde edilen blok kümelerinin, negatif koni ile optimize edilmesinden sonra bu blok kümesi blok modelden çıkarılır. Bu işlem alınabilecek pozitif değerli blok kalmayınca kadar devam etmektedir. Alınabilecek blok kümesi kalmadığında nihai sınırlara erişilmiş olur. Her iterasyonda bulunan blok kümeleri, yıllık üretim miktarına göre gruplandırılmakta ve net bugünkü değerleri hesaplanmaktadır.

Açık ocak nihai sınırlarının ve üretim sıralamasının diğer yöntemlere göre uygulanabilirliğinin test edilmesi, karşılaştırılabilmesi ve sonuçların değerlendirilebilmesi için geliştirilen algoritma, öncelikle 2B bir örnekte uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar; Lerchs ve Grossmann algoritması ile Sevim tarafından önerilen parametreleştirme yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların 2B örnek üzerinde olumlu sonuçlar vermesinden dolayı 3B bir uygulama yapılması uygun görülmüştür.

3B uygulama için MS Visual Basic programlama dili kullanılarak kodlanan yazılımdan faydalanılmıştır. 3B uygulama için gerçek bir manyetit içerikli ( $Fe_3O_4$ ) maden yatağının verileri kullanılmıştır. Bu maden sahasından elde edilen sondaj verileri ve topoğrafya üzerinde mantıksal değişiklikler yapılarak yeni bir saha düzenlenmiştir. Daha sonra cevher ve yan kayaç için blok model oluşturulmuştur. Oluşturulan blok modelde toplam 279.658 blok bulunmaktadır. Bu blok model üzerinde öncelikle; madencilikte tasarım ve planlama üzerine geliştirilmiş olan Micromine programı kullanılarak, Lerchs ve Grossmann algoritması ve parametreleştirme yöntemi ile iç içe ocaklar serisi elde edilmiş daha sonra da bu

Çalışmanın konusu olan Gelişmiş Hareketli Koni yöntemi ile üretim planlaması yapılmıştır.

Bu örnek saha üzerinde yapılan üretim planlaması sonuçlarına bakıldığında gelişmiş hareketli koni algoritması, açık ocak nihai sınırlarını bulma konusunda Lerchs ve Grossmann algoritması ile aynı optimum sonuçları vermektedir. Üretim sıralaması konusunda ise iç içe ocaklar serisi (parametreleştirme) yöntemiyle elde edilen ve ardından en iyi durum senaryosuyla hesaplanan net bugünkü değerin daha da üzerine çıkabileceği görülmüştür. Ayrıca yıllık üretim miktarı hedeflerinin daha başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş olduğu görülmektedir. Yöntemin işlem zamanı açısından dezavantajı bulunmaktadır.

Açık ocaklarda uzun vadeli üretim planlaması problemlerinde uygulanması düşünülen bu yöntemin sağlayabileceği en önemli avantajlar aşağıda belirtilmiştir;

- Üretim sıralaması yapılırken; her dönem için minimum kazı ile maksimum kazancı elde etmeye çalışarak net bugünkü değerin maksimize edilebilmesi
- Açık ocak üretim sıralamasını belirlerken eş zamanlı olarak nihai sınırların da bulunabilmesi
- Açık ocak nihai sınırlarının tespitinde sıklıkla kullanılan ve optimum sonuçlar veren LG algoritmasına alternatif olabilecek doğrulukta nihai sınır tespiti yapılabilmesi
- Gerektiğinde; şev açısı, yıllık üretim miktarı, cevher hazırlama tesisine beslenecek ortalama tenör, metal miktarı vb. benzer kısıtların kolaylıkla entegre edilebilecek olması
- Anlaşılması, kullanılması ve programlanması kolay bir yöntem olması

Bu doktora tezi sonrasında gelecekte yapılabilecek çalışmalar şu şekilde sıralanabilir;

- Üretim sıralaması yapılırken, blok ekonomik değerlerine göre değil de yıllara göre değişmeyecek olan parametreler (tenör, metal içeriği, dekapaj oranı vs.) ile üretim sıralamasının yapılması ve daha sonra bu üretim sıralamasına göre bloklara kazılacağı zamanki ekonomik değerlerin verilebilmesi
- Her iterasyonda kazılacak maksimum blok sayısının değişimiyle net bugünkü değerin değişiminin analizinin yapılması

- Farklı şev açılarının algoritmaya dâhil edilmesi
- Sınır tenör değerinin değişken olabileceği bir üretim planının ortaya koyulması
- Algoritmanın işlem zamanında iyileştirme sağlanması

Sonuç olarak; geliştirilen yöntemin (Gelişmiş Hareketli Koni) açık ocak nihai sınırlarının ve üretim sıralamasının optimizasyonunda alternatif olarak kullanılabilecek bir yöntem olduğu düşünülmektedir. Bu yöntemin daha da geliştirilmesi ile gelecekte optimum sonuçlar veren kullanışlı bir yöntem edilebilir.



## KAYNAKLAR

- Achireko, P. ve Frimpong, S.** (1996). Open pit optimization using artificial neural networks on conditionally simulated blocks. *Proceedings of APCOM'96*.
- Akaike, A. ve Dagdelen, K.** (1999). *A strategic production scheduling method for an open pit mine*. Paper presented at the Proceedings of the 28th International Symposium on Application of Computers & Operations Research in the Mineral Industry.
- Alford, C. ve Whittle, J.** (1986). *Application of lerchs-grossmann pit optimization to the design of open pit mines*. Paper presented at the AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, Large Open Pit Mining Conference.
- Ataee-Pour, M.** (2000). *A heuristic algorithm to optimise stope boundaries*. (Doctoral dissertation), University of Wollongong, Australia.
- Barnes, R. J.** (1982). *Optimizing the ultimate pit*. (Doctoral dissertation), Colorado School of Mines, USA.
- Bellman, R. E.** (1957). *Dynamic programming*: Princeton University Press.
- Berlanga, J., Cardona, R. ve Ibarra, M.** (1989). Recursive formulae for the floating cone algorithm. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 3(3), 141-150.
- Bjørndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C. ve Weintraub, A.** (2012). Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 39-62.
- Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G. ve Gleixner, A. M.** (2009). Lp-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1064-1089.
- Brahma, K. C.** (2007). *A study on application of strategic planning models and operations research techniques in opencast mining*. (Doctoral dissertation), National Institute Of Technology Rourkela, India.
- Bush, T. A.** (1999). A comparison of open pit design and scheduling techniques.
- Caccetta, L.** (2007). Application of optimisation techniques in open pit mining *Handbook of operations research in natural resources* (pp. 547-559): Springer.
- Caccetta, L. ve Giannini, L.** (1988). An application of discrete mathematics in the design of an open pit mine. *Discrete Applied Mathematics*, 21(1), 1-19.
- Caccetta, L. ve Hill, S. P.** (2003). An application of branch and cut to open pit mine scheduling. *Journal of global optimization*, 27(2-3), 349-365.

- Caccetta, L., Kelsey, P. ve Giannini, L.** (1998). *Open pit mine production scheduling*. Paper presented at the APCOM 98: Computer Applications in the Mineral Industries International Symposium.
- Chen, T.** (1976, 1976). *3d pit design with variable wall slope capabilities*. Paper presented at the 14th symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), New York.
- Coleou, T.** (1989). *Technical parameterization of reserves for open pit design and mine planning*. Paper presented at the Proc. 21st International APCOM Symposium.
- Coléou, T.** (1988). *Technical parameterization for open pit design and mine planning*. Paper presented at the Proc. 21st APCOM Symposium of the Society of Mining Engineers (AIME) pp.
- Crawford, J. T.** (1979). *Open-pit limit analysis—some observations on its use*. Paper presented at the Proceedings of the 16th APCOM Symposium.
- Dagdelen, K.** (1986). Optimum multi period open pit mine production scheduling. *Dissertation Abstracts International Part B: Science and Engineering*[DISS. ABST. INT. PT. B- SCI. & ENG.].
- Dagdelen, K.** (2005). Open pit optimization—strategies for improving economics of mine planning. *Orebody Modeling and Strategic Mine Planning—Uncertainty and Risk Management Models*, 14,, 125-128.
- Dagdelen, K. ve Francois-Bongarcon, D.** (1982). *Towards the complete double parameterization of recovered reserves in open pit mining*. Paper presented at the Proceedings of 17th international APCOM symposium.
- Dagdelen, K. ve Johnson, T. B.** (1986, 1986). *Optimum open pit mine production scheduling by lagrangian parameterization*. Paper presented at the 19th APCOM Symposium of the society of mining engineers (AIME).
- Denby, B. ve Schofield, D.** (1994). Open-pit design and scheduling by use of genetic algorithms. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, 103.
- Dowd, P. ve Onur, A.** (1992). *Optimising open pit design and sequencing*. Paper presented at the Proc. 23rd International APCOM Symposium.
- Drew, D. ve Baafi, E.** (2002). *Ultimate pit limit design using microsoft excel spreadsheet*. Paper presented at the APCOM 2002: 30 th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry.
- Earthworks.** (2014). Npv scheduler. 2014, from <http://www.earthworks.com.au>
- Elevli, B.** (1995). Open pit mine design and extraction sequencing by use of or and ai concepts. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 9(4), 149-453.
- Erarslan, K.** (1996). *Development of a model for open pit limits optimization integrated with a sequencing system*. (Doctoral dissertation), Middle East Technical University, Ankara.
- Erarslan, K. ve Celebi, N.** (2001). A simulative model for optimum open pit design. *Cim Bulletin*, 94(1055), 59-68.

- Erarslan, K., Çelebi, N. ve Paşamehmetoğlu, A.** (1999). *Açık ocak sınırlarının üretim planının bir fonksiyonu olarak simülatif optimizasyonu*. Paper presented at the Türkiye 16. Madencilik Kongresi.
- Ford, L. R. ve Fulkerson, D. R.** (1956). Maximal flow through a network. *Canadian journal of Mathematics*, 8(3), 399-404.
- Francois-Bongarcon, D. ve Guibal, D.** (1982). *Algorithms for parameterizing reserves under different geometrical constraints*. Paper presented at the Proc. 17th symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM: AIME).
- Francois-Bongarcon, D. ve Guibal, D.** (1984). Parameterization of optimal designs of an open pit-beginning of a new phase of research. *Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME*, 274, 1801-1805.
- Francois-Bongarcon, D. ve Marechal, A.** (1976). *A new method for open pit design: Parametrization of the final pit contour*. Paper presented at the APCOM SYMPOSIUM.
- Gaupp, M. P.** (2008). Methods for improving the tractability of the block sequencing problem for open pit mining, DTIC Document,
- Gershon, M.** (1982). A linear programming approach to mine scheduling optimization. *Applications of computers and operations research in the mineral industry*.
- Gershon, M.** (1987). Heuristic approaches for mine planning and production scheduling. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 5(1), 1-13.
- Gershon, M. E.** (1983). Optimal mine production scheduling: Evaluation of large scale mathematical programming approaches. *International Journal of Mining Engineering*, 1(4), 315-329.
- Giannini, L., Caccetta, L., Kelsey, P. ve Carras, S.** (1991). *Pitoptim: A new high speed network flow technique for optimum pit design facilitating rapid sensitivity analysis*. Paper presented at the Proceedings of Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Golosinski, T. S. ve Bush, T.** (2000). A comparison of open pit design and scheduling techniques. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 14(1), 53-61.
- Halatchev, R.** (2002). *The time aspect of the optimum long-term open pit production sequencing*. Paper presented at the APCOM 2002: 30 th International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry.
- Held, M., Wolfe, P. ve Crowder, H. P.** (1974). Validation of subgradient optimization. *Mathematical Programming*, 6(1), 62-88.
- Helgeson, W. ve Birnie, D.** (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering*, 12(6), 394-398.

- Hochbaum, D. S. ve Chen, A.** (2000). Performance analysis and best implementations of old and new algorithms for the open-pit mining problem. *Operations Research*, 48(6), 894-914.
- Hustrulid, W. A., Kuchta, M. ve Martin, R. K.** (2013). *Open pit mine planning and design, two volume set & cd-rom pack* (Vol. 1): CRC Press.
- Huttagosol, P.** (1988). *Modified tree graph algorithm for ultimate pit limit analysis*. Colorado School of Mines.
- Huttagosol, P. ve Cameron, R.** (1992). *A computer design of ultimate pit limit by using transportation algorithm*. Paper presented at the Proceedings of the 23rd International. APCOM Symposium.
- Jalali, S., Ataee-Pour, M. ve Shahriar, K.** (2006). Pit limits optimization using a stochastic process. *Canadian Institute of Mining Magazine*, 1(6), 90-94.
- Johnson, T. ve Barnes, R.** (1988). Application of maximal flow algorithm to ultimate pit design (Vol. 8): North-Holland, New York.
- Johnson, T. B.** (1968). Optimum open pit mine production scheduling. *California Univ Berkeley Operations Research Center*.
- Johnson, T. B.** (1969). Optimum production scheduling. *Proceedings of the 8th International Symposium on Computers and Operations Research*. 539-562.
- Johnson, T. B. ve Sharp, W. R.** (1971). *A three-dimensional dynamic programming method for optimal ultimate open pit design* (Vol. 7553): Bureau of Mines, US Dep. of the Interior.
- Kawahata, K.** (2007). *A new algorithm to solve large scale mine production scheduling problems by using the lagrangian relaxation method*. Colorado School of Mines.
- Khalokakaie, R.** (1999). *Computer-aided optimal open pit design with variable slope angles*. University of Leeds.
- Khan, A. ve Niemann-Delius, C.** (2014). Production scheduling of open pit mines using particle swarm optimization algorithm. *Advances in Operations Research*, 2014.
- Koenigsberg, E.** (1982). The optimum contours of an open pit mine: An application of dynamic programming. *17th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*. 274-287.
- Korobov, S.** (1974). Method for determining optimal open pit limits. *Rapport Technique EP*, 74.
- Kumral, M. ve Dowd, P. A.** (2002). *Short-term mine production scheduling for industrial minerals using multi-objective simulated annealing*. Paper presented at the APCOM 2002-International Symposium on the Application Of Computers And Operations Research In The Minerals Industry (30th: 2002: Littleton, Colorado).
- Laurich, R. ve Kennedy, B.** (1990). Planning and design of surface mines. *Surface Mining, Port City Press, Baltimore*. 465-469.

- Lemieux, M.** (1979). Moving cone optimizing algorithm. *Computer Methods for the*, 80, 329-345.
- Lerchs, H. ve Grossmann, I. F.** (1965). Optimum design of open-pit mines *Operations Research* (Vol. 12, pp. B59-&); INST OPERATIONS RESEARCH MANAGEMENT SCIENCES 901 ELKRIDGE LANDING RD, STE 400, LINTHICUM HTS, MD 21090-2909.
- Lipkewich, M. P. ve Borgman, L.** (1969). Two and three dimensional pit design optimization techniques. *A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry*. 505-523.
- Matheron, G.** (1975). Le paramétrage des contours optimaux. *Technique notes*, 401, 19-54.
- Menabde, M., Froyland, G., Stone, P. ve Yeates, G.** (2004). *Mining schedule optimisation for conditionally simulated orebodies*. Paper presented at the Proceedings of the international symposium on orebody modelling and strategic mine planning: uncertainty and risk management.
- Meyer, M.** (1969). Applying linear programming to the design of ultimate pit limits. *Management Science*, 16(2), B-121-B-135.
- Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A. ve Eurek, K.** (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245.
- Onur, A. H.** (1992). *Optimal open pit design and planning*. University of Leeds.
- Onur, A. H. ve Dowd, P.** (1993). Open-pit optimization- part 2: Production scheduling and inclusion of roadways. *TRANS INST MIN METALL SECT A MIN IND.*, 102, 105-113.
- Osanloo, M., Gholamnejad, J. ve Karimi, B.** (2008). Long-term open pit mine production planning: A review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 22(1), 3-35.
- Pana, M. T.** (1965). *The simulation approach to open pit design*. Paper presented at the APCOM SYMPOSIUM.
- Ramazan, S.** (2001). Open pit mine scheduling based on fundamental tree algorithm.
- Ramazan, S.** (2007). The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 1153-1166.
- Ramazan, S. ve Dagdelen, K.** (1998). *A new push back design algorithm in open pit mining*. Paper presented at the The Seventh International Symposium On Mine Planning And Equipment Selection, Calgary, University Laval.
- Ramazan, S., Dagdelen, K. ve Johnson, T.** (2005). Fundamental tree algorithm in optimising production scheduling for open pit mine design. *Mining Technology*, 114(1), 45-54.
- Ramazan, S. ve Dimitrakopoulos, R.** (2004). Recent applications of operations research and efficient mip formulations in open pit mining. *Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Transactions*, 316.

- Ramazan, S. ve Dimitrakopoulos, R.** (2004). Traditional and new mip models for production scheduling with in-situ grade variability. *International Journal of Surface Mining*, 18(2), 85-98.
- Roman, R.** (1974). *The role of time value of money in determining an open pit mining sequence and pit limits*. Paper presented at the 12th Apoom Symposium.
- Sandi, C.** (1979). Subgradient optimization. *Combinatorial optimization*, 73-91.
- Sattarvand, J.** (2009). *Long-term open-pit planning by ant colony optimization*: Universitätsbibliothek.
- Sattarvand, J. ve Niemann-Delius, C.** (2013). Past, present and future of metaheuristic optimization methods in long-term production planning of open pits. *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, 158(4), 146-154.
- Sevim, H. ve Lei, D. D.** (1994). *The state of long term production planning in open pit mining*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, October, Istanbul.
- Sevim, H. ve Lei, D. D.** (1998). Problem of production planning in open pit mines. *INFOR J*, 36(1), 1-12.
- Stermole, F. J. ve Stermole, J. M.** (1974). *Economic evaluation and investment decision methods*: Investment Evaluations Corporation.
- Thomas, G.** (1996). *Pit optimization and mine production scheduling-the way ahead*. Paper presented at the Proc. 26th APCOM Symposium of the Society of Mining Engineers.
- Tolwinski, B.** (1998). *Scheduling production for open pit mines*. Paper presented at the Computer applications in the minerals industries. International symposium.
- Tolwinski, B. ve Golosinski, T.** (1995). Long term open pit scheduler. *Mine Planning and Equipment Selection 1995*. 265.
- Tolwinski, B. ve Underwood, R.** (1992). *An algorithm to estimate the optimal evolution of an open pit mine*. Paper presented at the The 23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM) Proceedings. SME Publications, Littleton, Co.
- Underwood, R. ve Tolwinski, B.** (1998). A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem. *European Journal of Operational Research*, 107(1), 96-107.
- Wang, Q.** (1992). *Open pit production planning through pit generation and pit sequencing*. Southern Illinois University at Carbondale.
- Wang, Q. ve Sevim, H.** (1992). Enhanced production planning in open pit mining through intelligent dynamic search. *Institute of Mining Metallurgy (ed)*, 23, 461-471.

- Wang, Q. ve Sevim, H.** (1995). Alternative to parameterization in finding a series of maximum-metal pits for production planning. *Mining Engineering*, 47(2), 178-182.
- Weintraub, A., Miranda, J. P., Romero, C., Bjørndal, T. ve Epstein, R.** (2007). *Handbook of operations research in natural resources* (Vol. 99): Springer.
- Whittle, J.** (1988). *Beyond optimization in open pit design*. Paper presented at the Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industries.
- Whittle, J.** (1989). The facts and fallacies of open pit optimization. *Materialy firmy Whittle Programming Pty Ltd*.
- Whittle, J.** (1993). Four-d whittle open pit optimisation software-user manual. *Melbourne, Whittle Programming Pty Ltd*.
- Whittle, J.** (1998). Four-x user manual. *Melbourne: Whittle Programming Pty Ltd*.
- Whittle, J. ve Rozman, L.** (1991). *Open pit design in the 90's*. Paper presented at the Proceedings of Mining Industry Optimisation Conference.
- Wilke, F., Mueller, K. ve Wright, E.** (1984). *Ultimate pit and production scheduling optimization*. Paper presented at the Proc. 18th APCOM Symp., Insti. Min. Metal., New York, NY (March 26–30, 1984).
- Wilke, F. ve Wright, E.** (1984). Determining the optimal ultimate pit design for hard rock open pit mines using dynamic programming. *Erzmetall*, 37(3), 139-144.
- Wright, E. A.** (1987). The use of dynamic programming for open pit mine design: Some practical implications. *Mining Science and Technology*, 4(2), 97-104.
- Wright, E. A.** (1990). *Open pit mine design models: An introduction with fortran/77 programs*: Trans Tech Publications.
- Yamatomi, J., Mogi, G., Akaike, A. ve Yamaguchi, U.** (1996). *Selective extraction dynamic cone algorithm for three-dimensional open pit designs*. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts.
- Yegulalp, T., Arias, A., Muduli, P. ve Xi, Y.** (1994). New developments in ultimate pit limit problem solution methods. *TRANSACTIONS-SOCIETY OF MINING ENGINEERS OF AIME*. 1853-1853.
- Yegulalp, T. M. ve Arias, J.** (1992). *A fast algorithm to solve the ultimate pit limit problem*. Paper presented at the 23rd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industries.
- Zhang, S. ve Starfield, A.** (1985). Dynamic programming with colour graphics smoothing for open-pit design on a personal computer. *International Journal of Mining Engineering*, 3(1), 27-34.
- Zhao, Y. ve Kim, Y.** (1992). *A new optimum pit limit design algorithm*. Paper presented at the Proceedings 23rd International. APCOM Symposium.





## ÖZGEÇMİŞ

**Ad Soyad:** Murat ÖZKAN

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Sinop – 20/06/1979

**Adres:** İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Maslak - İstanbul

**E-Posta:** murat.ozkan@itu.edu.tr

**Lisans:** Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü

**Yüksek Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü

**Mesleki Deneyim:** Araştırma Görevlisi - İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü (2005 - ...)

### Yayın Listesi:

- **Ozkan, M.**, Ercelebi, S.G., 2007. "Determining Ultimate Pit Limit For Kestelek Boron Open Pit Mine, Using Lerchs-Grossmann Algorithm". *33th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, APCOM 2007*, Santiago, Chile.
- Dogan, T., **Özkan, M.**, Ozer, U., Kapar, K., Kahriman, A., Ercelebi, S.G., 2007. "Coğrafi Bilgi Sisteminin (CBS) Rezerv Tespitinde Kullanılabilirliği". *İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Yerbilimleri Dergisi*, C.20, S.2, SS. 81-91.
- Tuncdemir, H., **Ozkan, M.**, Unsal, A., Bayram, O., Guclucan, Z, And Akgul, M., 2011. "Geostatistical Evaluation Of Volumetric Surface Settlements From Surveying Data In A Weak Rock Tunnel". *ITA-AITES World Tunnel Congress Proceedings*, 20 - 26 May, Helsinki, Finland.
- **Ozkan, M.**, Kocak, P., Ozturk, C.A., Ercelebi, S.G., Nasuf, S.E., 2011. "Slope Stability Investigation Of A Boron Mine In Kirka, Turkey". *45th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, American Rock Mechanics Association (ARMA), 26-29 June, San Francisco, USA.
- Ercelebi, S. G., Öztürk, C. A., **Özkan, M.**, Önsel, İ. E. ve Yalçın, T. (2011). Slope Stability Analysis of Underground Water Induced Failure for Kestelek

Open Pit Boron Mine in Turkey, *ARMA's 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, 26.06.2011 - 29.06.2011.

- Önsel, İ. E., Öztürk, C. A., **Özkan, M.** ve Nasuf, E. (2011). Software for RQD and Rock Mass Evaluation, *ARMA's 45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*, San Francisco, 26.06.2011 - 29.06.2011
- Öztürk, C. A., Önsel, İ. E., **Özkan, M.**, Fişne, A., Erçelebi, S. G., 2015. Production of Asphaltite by Underground Mining Methods, *Madencilik Türkiye, Journal of Underground Resources*, 2015.
- Erçelebi, S. G., Öztürk, C.A., Önsel, İ.E. ve **Özkan, M.**, 2015. Mine Design for Silopi Üçkardeşler Asphaltite Vein, *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, IMCET, 2015.
- Öztürk, C.A., Erçelebi, S. G., Önsel, İ.E., **Özkan, M.**, Zengin, M., Arslan, D., Tuncel, Y. ve Baz, Z., 2015. Open pit mine waste dump area design based on stability principles, *Türkiye 24. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, IMCET, 2015.

#### TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

- **Özkan, M.**, Erçelebi, S. G. (2014). Açık Ocak Nihai Sınırlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler, *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg.*, C.2, S.3, 2014.