

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANI**  
**OPTİMİZASYONU**



**Gökhan TURAN**

**Ekim, 2022**

**İZMİR**

# **AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANI OPTİMİZASYONU**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden İşletme Programı**

**Gökhan TURAN**

**Ekim, 2022**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**GÖKHAN TURAN** tarafından **PROF. DR. AHMET HAKAN ONUR** yönetiminde hazırlanan “**AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANI OPTİMİZASYONU**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR

Yönetici

Prof. Dr. Yalçın ÇEBİ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Doç. Dr. Doğan KARAKUŞ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Ahmet DAĞ

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ayhan KESİMAL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Yüksek öğrenim hayatım boyunca iş ahlakını ve meslek etiğini örnek aldığım, çalışmalarımın gelişmesini sağlayan ve yol gösteren danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR'a,

Doktora öğrenimim boyunca çalışmaya büyük özveri ve ilgiyle yaklaşan, sadece yüksek öğrenim hayatımda değil, yaşam boyu hedeflerimde bana ışık tutan, farklı bakış açısı kazanmamı sağlayan tez izleme komitesi üyesi Bilgisayar Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Yalçın ÇEBİ'ye,

Her konuda desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, çalışmamla ilgili bulduğu her kaynağı benim paylaşan, her bulduğu fırsatta kendisini geliştirmeye çalışmasıyla bana örnek olan tez izleme komitesi üyesi Sayın Doç. Dr. Doğan KARAKUŞ'a,

Akademik çalışmalarımın yol gösteren, her anımda yanımda olan, tecrübelerinden faydalanarak zaman kazanmamı sağlayan Sayın Doç. Dr. Mehmet Volkan ÖZDOĞAN'a,

Beni her zaman destekleyen, ilerlemekte zorlandığımda motivasyonumu tekrar kazanmamı sağlayan kadim dostum Dr. Öğr. Üyesi Ali Kemal EYUBOĞLU'na ve mesai arkadaşlarım Araş. Gör. Çağrı ÇERİK ve Araş. Gör. Mehmet Emre KILINÇ'a,

Ve bugünlere ulaşmamı sağlayan, bana duydukları sonsuz güven ve sevgiyle beni her zaman ve her konuda destekleyen sevgili aileme sonsuz teşekkürler.

Gökhan TURAN

# AÇIK İŞLETMELERDE ÜRETİM PLANI OPTİMİZASYONU

## ÖZ

Açık ocak işletmelerinde, madencilik operasyonlarının verimli bir şekilde yürütülmesi ve en yüksek kârın elde edilmesi iyi hazırlanmış bir üretim planıyla mümkündür. Ayrıca doğal kaynakların verimli kullanılması sürdürülebilirlik açısından da önemlidir. Ancak kontrol altına alınması gereken parametreler karmaşık bir probleme sebep olmaktadır. Özellikle metal madenciliğinde, metal fiyatlarındaki dalgalanmalar, jeolojik belirsizlikler ve madencilik faaliyetlerinin uzun yıllar sürmesi sebebiyle dar boğazlar yaşanmaktadır.

Açık işletmelerde üretim planı optimizasyonu probleminin çözümü için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. En çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi parametrik analiz yöntemidir. Fakat bu yöntem, özellikle uygun blok çıkarılma sıralamasını tespit etmekte yetersizdir. Bu çalışmada, koni çıkarılma sıralaması geliştirilerek, her dönemde eşit miktarda cevher üretiminin sağlanabildiği bir yöntem sunulmaktadır. Mevcut hareketli koni algoritmalarındaki eksiklikler giderilmiş ve parametrik analiz yöntemiyle uzun dönem üretim planlaması sorununa alternatif çözüm üretilmiştir.

Yöntem, örnek çalışma olarak altın ve tungsten madenlerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar umut verici olarak değerlendirilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Açık ocak madenlerinde optimizasyon, üretim planlaması, nihai ocak sınırı, hareketli koni algoritması

# OPTIMIZATION OF PRODUCTION PLANNING IN OPEN PIT MINING

## ABSTRACT

In open pit mining, efficient execution of mining operations and obtaining the highest profit is possible with a well-prepared production plan. In addition, the efficient use of natural resources is also important in terms of sustainability. However, the parameters that need to be controlled cause a complex problem. Especially in metal mining, bottlenecks are experienced due to fluctuations in metal prices, geological uncertainties and mining activities that last for many years.

Many studies have been carried out to solve the production plan optimization problem in open mines. One of the most used methods is the parametric analysis method. However, this method is particularly inefficient in determining the appropriate block extraction sequence. In this study, a method is presented by improving the cone extraction sequence, in which equal amount of ore production can be achieved in each period. The deficiencies in the existing floating cone algorithms have been eliminated and an alternative solution to the long-term production planning problem has been produced by using the parametric analysis method.

The method has been applied as a case study in gold and tungsten mines and the results are considered promising.

**Keywords:** Open-pit optimization, production planning, ultimate pit limit, floating cone algorithm

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xii
<b>BÖLÜM 1 - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM 2 - KONUYLA İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>3</b>
2.1 Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların Özeti .....	3
2.2 Hareketli Koni Algoritması Özeti .....	10
<b>BÖLÜM 3 - YÖNTEM .....</b>	<b>13</b>
3.1 Giriş .....	13
3.2 Bloğun Ekonomik Değerinin Belirlenmesi.....	13
3.3 Sınır Tenör Hesabı.....	15
3.4 Geliştirilmiş Hareketli Koni Algoritmasıyla Nihai Ocak Sınırının Belirlenmesi.....	16
3.4.1 Blok Çıkarılma Sıralamasında Yapılan Geliştirmeler.....	20
3.4.2 Bağımlı Koni Konusunda Yapılan Geliştirmeler.....	21
3.4.3 Konilerin Birlikte Çıkarılması Durumu İncelenmesinde Konilerin Kümülatif Ekonomik Değerinin Yorumlanmasında Yapılan Geliştirmeler .....	26
3.4.4 Geliştirilmiş Hareketli Koni Algoritmasının Doğruluğunun Araştırılması .....	34

3.5 Periyot Sınırlarının Belirlenmesi.....	36
3.5.1 İç İçe Ocak Sınırlarının Belirlenmesi.....	37
3.5.2 Periyot Sınırlarının Belirlenmesi .....	38
3.5.3 Net Bugünkü Değer Hesabı.....	39
<b>BÖLÜM 4 - ÇALIŞMA KAPSAMINDA GELİŞTİRİLEN YAZILIM VE ÖRNEK ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>44</b>
4.1 Giriş .....	44
4.2 Yazılım Arayüzünün Tanıtılması .....	44
4.3 Altın Madeni Verileriyle Yapılan Örnek Çalışma .....	56
4.4 Tungsten Madeni Verileriyle Yapılan Örnek Çalışma .....	65
<b>BÖLÜM 5 - SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA.....</b>	<b>75</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>76</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 İki boyutlu EBM’de örnek bir koni.....	11
Şekil 3.1 Koni bölgeleri .....	17
Şekil 3.2 GHKA’nın akım şeması .....	20
Şekil 3.3 Örnek bir iki boyutlu EBM.....	21
Şekil 3.4 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.3’te verilen EBM’deki BÖD’ler .....	23
Şekil 3.5 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.3’te verilen EBM için bulunan nihai ocak sınırı.....	24
Şekil 3.6 GHKA’ya göre, güncel blok ekonomik değerleri.....	24
Şekil 3.7 GHKA’ya göre, Şekil 3.3’te verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri.....	25
Şekil 3.8 GHKA’ya göre BÖD’ler .....	25
Şekil 3.9 GHKA’ya göre, Şekil 3.3’te verilen EBM için tespit edilen ve en yüksek kâr değerini veren nihai ocak sınırı.....	26
Şekil 3.10 Örnek bir iki boyutlu EBM.....	27
Şekil 3.11 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için, ilk iki seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları.....	28
Şekil 3.12 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için, ilk üç seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları.....	30
Şekil 3.13 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için bulunan nihai ocak sınırı .....	30
Şekil 3.14 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri.....	31
Şekil 3.15 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için, ilk iki seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları .....	32
Şekil 3.16 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri.....	33
Şekil 3.17 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için, ilk üç seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları.....	34

Şekil 3.18 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için tespit edilen ve en yüksek kâr değerini veren nihai ocak sınırı.....	34
Şekil 3.19 Periyot sınırları oluşturma algoritmasına ait akım şeması .....	39
Şekil 4.1 Çalışma klasörü seçim ekranı .....	45
Şekil 4.2 Örnek topoğrafya koordinatları dosyası.....	46
Şekil 4.3 Örnek tenör verileri dosyası.....	47
Şekil 4.4 EBM oluşturma ekranı .....	48
Şekil 4.5 Örtü-kazı oranı optimizasyonu kullanıcı arayüzü.....	49
Şekil 4.6 Sayılar bölümüne ait örnek ekran görüntüsü.....	50
Şekil 4.7 Örnek veriye ait 10 gruptan oluşan tenör dağılımı ekran görüntüsü.....	51
Şekil 4.8 Kesitler bölümü örnek ekran görüntüsü .....	53
Şekil 4.9 Cevherleşme ve tenör dağılımına ait örnek görünüş.....	55
Şekil 4.10 Altın madeni verisi Doğu-Batı yönünde periyot sınırları kesit görünüşü .61	
Şekil 4.11 Altın madeni verisi Kuzey-Güney yönünde periyot sınırları kesit görünüşü .....	62
Şekil 4.12 Altın madeni verisi Doğu-Batı yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü.....	63
Şekil 4.13 Altın madeni verisi Kuzey-Güney yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü.....	64
Şekil 4.14 Tungsten madeni verisi Doğu-Batı yönünde periyot sınırları kesit görünüşü .....	71
Şekil 4.15 Tungsten madeni verisi Kuzey-Güney yönünde periyot sınırları kesit görünüşü .....	72
Şekil 4.16 Tungsten madeni verisi Doğu-Batı yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü .....	73
Şekil 4.17 Tungsten madeni verisi Kuzey-Güney yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü .....	74

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 3.1 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.3'te verilen EBM'deki cevher blokları için ECBD'ler .....	22
Tablo 3.2 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler.....	23
Tablo 3.3 GHKA'ya göre Şekil 3.3'te verilen EBM'deki KED'ler .....	24
Tablo 3.4 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için güncel KED'ler .....	25
Tablo 3.5 GHKA'ya göre, güncel KED'ler ve etkisiz cevher bloğu değerleri .....	25
Tablo 3.6 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler .....	26
Tablo 3.7 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.10'da verilen EBM'deki cevher blokları için ECBD'ler.....	28
Tablo 3.8 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.10'da verilen EBM'deki cevher blokları için güncel ECBD'ler.....	28
Tablo 3.9 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler .....	29
Tablo 3.10 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk üç seviyede yer alan cevher blokları için ECBD'ler .....	29
Tablo 3.11 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk üç seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler .....	30
Tablo 3.12 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için ilk iki seviyede yer alan konilerin KED'leri.....	31
Tablo 3.13 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk iki seviyede yer alan cevher blokları için ECBD'ler.....	31

Tablo 3.14 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk iki seviyede yer alan cevher blokları için güncel ECBD'ler.....	32
Tablo 3.15 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk iki seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler .....	32
Tablo 3.16 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için ilk üç seviyede yer alan konilerin KED'leri.....	33
Tablo 3.17 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk üç seviyede yer alan cevher blokları için ECBD'ler .....	33
Tablo 3.18 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk üç seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler .....	34
Tablo 3.19 GHKA ile Pit Optimiser modülünün nihai ocak sınırı tespitinin karşılaştırma sonuçları .....	35
Tablo 3.20 Örnek işletmenin periyot geçişlerine ait cevher üretim miktarları, geçiş süreleri ve kâr değerleri.....	41
Tablo 3.21 Örnek işletmenin yıllara ve sürenin ondalıklı kısımlarına göre NBD verileri .....	42
Tablo 4.1 Altın madeni verisi için oluşturulan iç içe ocaklara ait sonuçlar .....	56
Tablo 4.2 Altın madeni verisi için oluşturulan periyot sınırlarına ait sonuçlar.....	59
Tablo 4.3 Altın madeni verisine ait tenör dağılım sonuçları.....	60
Tablo 4.4 Tungsten madeni verisi için oluşturulan iç içe ocaklara ait sonuçlar .....	65
Tablo 4.5 Tungsten madeni verisi için oluşturulan periyot sınırlarına ait sonuçlar ...	68
Tablo 4.6 Tungsten madeni verisine ait tenör dağılım sonuçları .....	69

## KISALTMALAR

NBD	: Net Bugünkü Değer
BÇS	: Blok Çıkarılma Sıralaması
EBM	: Ekonomik Blok Model
BED	: Bloğun Ekonomik Değeri
KÖD	: Koni Önem Değeri
KED	: Koni Ekonomik Değeri
NÖD	: Nihai Önem Değeri
ECBD	: Etkisiz Cevher Bloğu Değeri
BÖD	: Bloğun Önem Değeri
GHKA	: Geliştirilmiş Hareketli Koni Algoritması

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

Madencilik, yer altındaki maden cevherlerinin, endüstriyel hammadde ve çeşitli faaliyetlerde kullanılmak üzere belirli mühendislik teknikleri kullanarak çıkarılması işidir. Eski çağlardan günümüze devam eden madenciliğin dezavantajlarından bir tanesi kaynağın sınırlı olmasıdır. Özellikle açık ocak madenciliği açısından yeryüzüne yakın yüksek tenörlü maden cevherleri gün be gün tükenmektedir. Öbür yandan teknolojinin gelişmesiyle düşük tenörlü cevherlerin çıkarılması ise daha ekonomik hâle gelmektedir. Kaynakların verimli kullanılması bilinci günümüzde hızla artmaktadır. Bu sebeple verimli bir üretimin gerçekleştirilmesinde üretim planı önemli rol oynamaktadır.

Maden planlamasının önemli aşamalarından bir tanesi uzun dönem üretim planıdır. Madencilik faaliyetleri genellikle uzun yıllar süren faaliyetlerdir. Uzun dönem üretim planının amacı; ekonomik, teknik ve çevresel kısıtlar göz önünde bulundurularak, cevher ve dekapaj malzemesinin çıkarılması ve nakledilmesi, çıkarılan cevherin zenginleştirilmesi, satış ve pazarlaması sonucu elde edilen indirgenmiş kârı en yüksek kılmaktır.

Üretim planının hazırlanmasının ilk aşaması; maden sahası sondaj verilerinin değerlendirilmesidir. Bu veriler sayesinde sahanın ve cevherin geometrik ve jeolojik özellikleri, kalite dağılımı gibi bilgilere ulaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında ise saha belirli ölçülerdeki bloklardan oluştuğu varsayıp, veriler blok model şekline getirilerek üç boyutlu cevher kütlesi görselleştirilmektedir. Sonraki aşamada ise literatürde iki yaklaşım mevcuttur. Birinci yaklaşım geleneksel yaklaşımdır. Bu yöntemin ilk adımının amacı; mevcut ekonomik koşullar göz önünde bulundurularak, çıkarılması durumunda en yüksek kârın elde edildiği cevher bloklarını saptamaktır. Geometrik ve jeolojik kısıtlar göz önünde bulundurularak bu cevher blokların çıkarılmasıyla oluşan çukura nihai ocak sınırı adı verilmektedir. Yöntemin ikinci adımında ise belirlenen nihai ocak sınırı içindeki blokların çıkarılma sıralaması belirlenmektedir. Blokların çıkarılma sırası, işletmenin kârlılığını belirleyen en önemli

faktörlerin başında gelmektedir. Bu doğrultuda, madencilik operasyonların başlangıç yerinin belirlenmesi, kazı yönünün tayin edilmesi ve bunların zamanlaması belirlenmektedir. İkinci yaklaşım ise direkt BÇS'nin tespit edilmesini amaçlamaktadır. Özellikle metal fiyatlarının zamana göre değişmesi göz önünde bulundurularak mevcut ekonomik koşullarla nihai ocak sınırının tespit edilmesi yerine, paranın zamanla değer kaybetmesini hesaba katarak direkt olarak üretim planlaması ortaya konmaktadır. İki yaklaşımın da kendi içlerinde avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Bu çalışmada, geleneksel yaklaşımda olduğu gibi ilk olarak nihai ocak sınırı tespit edilmektedir. Parametrik analiz yöntemiyle iç içe geçmiş ocaklar üretilmektedir. Bu sayede madencilik operasyonlarının başlama yeri ve kazı yönü belirlenmektedir. Üretim miktarı ve yapılacak dekapaj miktarı optimize edilerek cevher zenginleştirme tesisine kesintisiz bir cevher beslemesinin sağlanması amaçlanmaktadır.

## BÖLÜM 2

### KONUYLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Konuyla İlgili Yapılan Çalışmaların Özeti

Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından geliştirilen grafik teorisinde sahadaki bloklar düğüm noktaları olarak isimlendirilmektedir. Bir cevher bloğunun çıkarılması için kazılması gereken bloklar ile ilgili cevher bloğu arasında zayıf ve güçlü olarak tanımlanan ilişkiler kurulmaktadır. Bu ilişkiler çizilen yaylarla temsil edilmektedir. Kök bloktan başlayarak belirli kurallarla çizilen ve zayıf ve güçlü yayların değerlendirilmesi sonucu en yüksek ekonomik ocak değerinin elde edildiği kapanım tespit edilmektedir. Bu kapanım, en yüksek kârı veren nihai ocak sınırır.

Picard (1976), en uygun nihai ocak sınırının bulunması probleminin çözümünün bir ağdaki maksimum akış probleminin çözümüyle aynı olduğunu ispatlamıştır. Lerchs ve Grossmann (1965) algoritmasında olduğu gibi kök bloklarının kümesi  $V$  ve bu bloklardan çizilen yayların  $A$  olduğu bir yönlendirilmiş grafiğin ( $G = (V, A)$ ) maksimum kapanım değeri en uygun nihai ocak sınırır.

Hochbaum (2008) ağdaki maksimum akış problemi çözümü için yalancı akış (pseudoflow) algoritmasını sunmuştur.

Açık maden ocaklarında üretim planı, işletmenin ömrü boyunca, madencilik faaliyetlerinin başlangıcından sonuna kadar olan süreci içermektedir. Bu süreç boyunca kesintisiz olarak cevher akışının sağlanması, işletmenin sürdürülebilirliği ve nakit akışı açısından önem teşkil etmektedir. Bu doğrultuda ve aynı zamanda işletmenin kârlılığını maksimize etmek için ocaktaki madencilik operasyonlarının başlangıç ve bitiş bölgelerinin ve kazı yönünün tayin edilmesi gerekmektedir. Bunun için nihai ocak sınırı içinde daha küçük boyutlarda ve iç içe geçmiş ocakların sınırlarının belirlenmesi literatürde kabul görmüş bir yöntemdir. Üretim periyotları iç içe geçmiş ocakların sınırlarının belirlenmesinden sonra oluşturulmaktadır.

Periyot sınırları, işletmenin belirli zaman aralıklarında yapılacak olan dekapaj kazısı ve cevher üretim bölgesini göstermektedir. Değerli cevherin mümkün olduğunca öncelikli çıkarılması, NBD’de artış sağlamaktadır. Bu sebeple üretim periyot sınırlarının optimize edilmesi; zenginleştirme işlemleri, cevherin pazarlanması ve işletme dönemi giderlerinin karşılanması açısından önemlidir.

Consuegra ve Dimitrakopoulos (2010), çok aşamalı periyot sınırı tespit yaklaşımıyla NBD’yi arttırma amacıyla tam sayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu yöntemde öncelikle iç içe ocak sınırları tespit edilmektedir. Ardından hedef periyot sayısına ulaşmak için iç içe ocaklar gruplandırılmaktadır. Gruplandırılmış iç içe ocakların her biri periyot sınırındır. Bu periyot sınırları kullanılarak üretim planı oluşturulmaktadır. Bu yöntem, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, NBD’de yaklaşık olarak %30 artış elde edilebildiği saptanmıştır.

Askari-Nasab, Pourrahimian, Ben-Awuah ve Kalantari (2011), büyük ölçekli uzun dönem açık ocak üretim planlaması için karışık tamsayı doğrusal programlama formülasyonları sunmuşlardır. Blok çıkarma kısıtlarını göz önünde bulundurarak hem çıkarılan cevherin tenörünü kontrol altında tutarak hem de madencilik ve zenginleştirme kapasitelerini optimize ederek NBD’yi maksimize etmeyi amaçlamışlardır.

Shishvan ve Sattarvand (2015), açık ocak madenlerinde üretim planlaması problemi için deneysel bir yöntem olan karınca kolonisi optimizasyonunu sunmuşlardır. Özellikle büyük ölçekli maden sahalarının optimizasyonundaki problemin çözülmesi için gereken zamanın fazla olmasına dikkat çekmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemle hesaplama süresini %12’ye varan seviyelerde azaltmayı başarmışlardır.

Liu ve Kozan (2016), büyük ölçekli problemleri daha verimli ve etkili bir şekilde çözebilmek için ağ akış ve zaman çizelgeleme teorisi tabanlı iki yeni algoritma geliştirmişlerdir.

Esmail, Ehsan, Reza ve Mehran (2018), optimum sınır tenörün tespit edilmesi üzerine çalışmalar yürütmüşlerdir. Mevcut yöntemlere oranla ekonomik olarak daha fazla cevherin üretilmesini amaçlamışlardır. Bu sayede daha verimli örtü-kazı oranlarında çalışmanın mümkün olabileceğini belirtmişlerdir.

Gu, Wang, Xu ve Ma (2021), NBD'yi maksimize etmeyi amaçlayarak aynı anda periyot sayısını, periyot sınırlarını ve nihai ocak sınırı optimize eden bir dinamik programlama formülasyonu sunmuşlardır. Özellikle yatay kömür damarlarında kullanılan sütun şeklinde blok model kullanmışlardır. Geliştirdikleri yöntem sayesinde geleneksel yöntemde karşılaşılan iç içe ocaklar arasındaki açıklık sorununun üstesinden gelmeyi başarmışlardır.

Lamghari, Dimitrakopoulos ve Senécal (2021), madencilik, zenginleştirme, stoklama, dekapaj malzemesi kontrolü ve nakliye faaliyetlerinin aynı anda optimize edilmesinin üretim hedeflerinin karşılanmasında ve NBD'nin maksimize edilmesinde avantajı olduğuna, fakat bu işlemin çözülmesi zor ve karışık olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bahsedilen faaliyetlerin aynı anda optimize edilmesi amacıyla bir matematiksel formülasyon sunmuşlardır. Bu formülasyonun çözülebilmesi için makine öğrenme tekniklerini ve yerel iyileştirme ve rastgele arama gibi buluşsal yöntemleri birleştiren yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir.

Cevher bloklarının çıkarılma sıralaması elde edilecek NBD'yi etkilemektedir. Bu sebeple üretim planı optimizasyonunun bir parçası olarak kabul edilmeli ve en uygun BÇS tespit edilmelidir. Nanjari ve Golosinski (2013), NBD'yi maksimize eden en uygun blok sıralaması ve periyot sınır genişliğini belirlemek üzere bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritma, dinamik programlama ve madencilik buluşsal yöntemlerini birleştirir ve fiyat değişkenlerinin, maliyetlerin, sınır tenörlerin ve diğer maden tasarım parametrelerinin dahil edilmesini sağlar. Yazarlar tarafından geliştirilen algoritmanın test çalışmaları, tutarlı bir şekilde, parametrik teknikler kullanılarak oluşturulanlardan daha yüksek NBD'ye sahip maden ocaklarının planlanabilmesine yol açmıştır.

Topal ve Ramazan (2012), sundukları doğrusal programlama modeliyle işletme ömrü 50 yıl olan ve 100'den fazla ocak ve 13 tesis içeren işletmenin stratejik planını optimize etmeyi başarmışlardır. Kullandıkları yöntemle elde ettikleri NBD'de, mevcut paket programların ürettiği sonuçlarla karşılaştırdıklarında, yaklaşık %10-20 oranında artış elde ettiklerini gözlemlemişlerdir.

Lambert, Brickey, Newman ve Eureka (2014), doğrusal programlama modellerinin çözüme ulaşması için gereken hesaplama süresini kısaltmayı amaçlamışlardır. Bu doğrultuda alternatif değişken tanımlamaları sunma, kök düğüm doğrusal programlama gevşemesini çözmek için algoritmik seçim, değişken eliminasyonu ve çözücü programa hesaplama süresini kısaltmak için bir ilk çözüm sunmayı denemişlerdir.

Meaghera, Dimitrakopoulos ve Avis (2014), iç içe ocaklar oluşturarak kazı yönünün tespit edilmesinde, art arda iki ocak arasındaki açıklığın istenilenden fazla olması durumunda en uygun çözümden uzaklaşıldığına dikkat çekmişlerdir. Lerchs ve Grossmann algoritması, ağ akış teknikleri ve temel ağaç algoritması gibi yöntemleri değerlendirerek, iç içe ocakların tasarımlarını ve meydana gelen açıklıkları incelemişlerdir. Yazarlar, mevcut yöntemlerin farklı bir çerçevede ve matematiksel model kullanarak geliştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Mousavi, Kozan ve Liu (2016), açık ocak madenciliğinde, hemen hemen tüm ilgili fiziksel ve teknik yönleri ele alan, kısa vadeli cevher bloğu çıkarma sıralaması için yeni ve kapsamlı bir matematiksel programlama modeli geliştirmiştir. Benzetimli tavlama, Tabu arama ve bu iki yöntemin birleşimini geliştirerek açık ocaklarda blok sıralaması problemini çözmeyi amaçlamışlardır.

Campos, Cabral, Ortiz ve Morales (2018), geleneksel yöntem olan ilk olarak nihai ocak sınırının tespit edilmesi ve ardından periyot sınırlarının belirlenmesinin dezavantajlarından bahsetmişlerdir. Geleneksel yöntemde özellikle fırsat maliyetinin göz önünde bulundurulmamasının ve sınır tenörünün sabit olmasının en uygun çözümden uzaklaşmaya sebep olduğunu açıklamışlardır. Geleneksel yöntemin aşamalarını

birleştirek direkt olarak cevher blok sıralamasının tespit edilmesinin daha doğru bir yaklaşım olabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu doğrultuda paket programlar kullanarak iki yöntemi kıyaslamışlardır. İki yöntemin de avantaj ve dezavantajlarını açıklamaya çalışmışlardır.

Liu ve Kozan (2019), ocak tasarımı, BÇS ve üretim planlaması için karma tamsayı programlama modeli ve hibrit çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Geliştirdikleri yöntemle ocağın uzun, orta ve kısa dönem planı ortaya koymaya çalışmışlardır. Uzun dönem planlamada nihai ocak sınırı tespit edilmiştir. Orta dönem planlamada BÇS belirlenmiştir. Kısa dönem planlamada ise madencilik ekipmanlarının optimizasyonu ve delme, patlatma ve kazı operasyonlarının optimizasyonlarını ortaya koymayı amaçlamışlardır.

Mousavi, Kozan ve Liu (2016a), önerdikleri açık ocak madenciliğinde hemen hemen tüm ilgili teknik yönleri dikkate alan, kısa vadeli bir açık ocak maden blok sıralama problemi için kapsamlı bir matematiksel formülasyon modeliyle, blokların kısa zaman aralıklarında ve öncelik ilişkisi, makine kapasitesi, kalite gereksinimleri, cevher zenginleştirme talepleri ve stok yönetimi dahil olmak üzere gerçek senaryo kısıtlamalarının varlığında en uygun BÇS'yi elde etmeyi amaçlamaktadır. Yöntemi küçük ve büyük boyuttaki maden ocağı verilerine uygulamışlar ve sonuçların umut verici olduğunu ifade etmişlerdir.

Üretim planlama optimizasyonu, fizibilite çalışmaları ile başlayan ve madenin ömrü boyunca devam eden bir süreçtir. Değerlendirilen parametrelerin bazıları sabit parametreler olmakla birlikte çoğu zaman içinde değişmektedir. Bu nedenle optimizasyon gerektiğinde tekrarlanmalıdır. Cevher fiyatlarındaki dalgalanmalar, özellikle metal madenciliğinde dar boğazlara neden olabilir.

Lamghari ve Dimitrakopoulos (2012), metal belirsizliği olan açık ocak maden üretim planlaması problemi için Tabu aramasına dayalı meta sezgisel bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır. Çalışmada sondaj verilerinin metal içeriğini belirlemek için

sınırlı bilgi içerdiğinden bahsedilmektedir ve daha etkili bir çözümün gerekliliğine vurgu yapılmaktadır.

Canessa, Moreno ve Pagnoncelli (2021), çalışmalarında geleneksel yöntemde kullanılan gelir indirgeme faktörü yerine metal belirsizliği sebebiyle risk faktörü kullanarak iç içe ocakları oluşturmaktadırlar. Bu doğrultuda olasılıksal programlama formülasyonu geliştirmişlerdir. Yöntemlerini 25 bin bloktan oluşan küçük bir madene uygulamışlar ve geleneksel yöntemle karşılaştırmışlardır. Risk faktörü kullanıldığında daha başarılı sonuçlar elde ettiklerini vurgulamışlardır.

Gholannejad ve Moosavi (2012), cevher kütlesi içindeki jeolojik belirsizliği içeren uzun vadeli üretim planlaması için yeni bir ikili tamsayı programlama modeli geliştirmiştir. Ardından, bir demir cevheri yatağına geleneksel ve belirsizliğe dayalı modeller uygulanmıştır. Sonuçlar, belirsizliğe dayalı yaklaşımın, üretim hedefleri açısından geleneksel yaklaşımlardan daha pratik üretim planları sağladığı gözlemlenmiştir.

Ramazan ve Dimitrakopoulos (2013), açık ocak üretim planlaması optimizasyonu etkileyen başlıca unsurun, maden sahasında bulunan mineralize malzemelerdeki tenör ve rezerv açısından belirsiz olduğunu vurgulamışlardır. Belirsiz arzı optimizasyona entegre etmek için iki aşamalı olasılıksal tam sayılı programlamaya dayalı yeni bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Model bir altın madeni verilerine uygulanmış ve geleneksel yöntemle kıyaslandığında NBD'de %10'luk artış olduğu gözlemlenmiştir.

Xu, Gu, Wang, Liu ve Wang (2014), açık ocak metal madenciliğinin ekolojik maliyetleri, doğrudan ekolojik hizmetlerin kayıp değeri, dolaylı ekolojik hizmetlerin kayıp değeri, önleme ve restorasyon maliyetleri ve enerji tüketiminden kaynaklanan karbon emisyonu maliyetini içerdiğinden bahsetmektedir. Bu ekolojik maliyetlerin üretim planı optimizasyonuna dahil edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Ekolojik maliyetlerin nihai ocak sınırı ve üretim planındaki etkilerini gözlemlmek için bir maden sahası verileri üzerinde uygulamışlardır. Sonuçlar, maden tasarımlarında

ekolojik maliyetlerin entegresinin mümkün olduğunu göstermektedir. Ekolojik maliyetler göz önünde bulundurularak nihai ocak sınırı ve üretim planı oluşturulduğunda, kârlılığın önemli ölçüde azaldığını gözlemlemiştir.

Lamghari ve Dimitrakopoulos (2016), metal belirsizliğini hesaba katan ve stoklar da dahil olmak üzere malzemenin nakliyesi için birden fazla varış noktası göz önünde bulunduran açık ocaklarda üretim planlaması optimizasyonu için yeni bir formülasyon tanıtmışlardır. Sayısal testlerde, önerilen çözüm yöntemlerinin etkili olduğu, standart ticari çözümlerin çözemediği örnekleri birkaç dakika ile birkaç saat arasında çözülebildiği gözlemlenmiştir.

Chatterjee, Sethi ve Asad (2016), belirsizlik altında açık ocak maden tasarımı optimizasyonu, maden planlama sürecindeki en kritik ve zorlu görevlerden birisi olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada, emtia fiyatı veya piyasa belirsizliği altında optimal üretim aşaması ve nihai ocak sınırı tasarımı için bir minimum kesme ağ akış algoritmasının uygulanması açıklanmaktadır. Önerilen yöntem mevcut bir demir madeninde uygulanmış ve geleneksel yöntemle göre %48 daha yüksek NBD elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sahadan ekonomik olarak çıkarılabilecek cevher miktarında da artış görülmüştür.

Baek, Choi ve Park (2016), çalışmalarında metal fiyatlarındaki değişimler nedeniyle üretim planı optimizasyonu sonuçlarındaki belirsizliği nicel olarak ifade edebilmek için yeni bir yöntem sunmuşlardır. Geçmiş maden fiyatlarına ilişkin verilerle Monte Carlo simülasyonu kullanılarak çoklu maden fiyatları üretildikten sonra, maden fiyatlarından elde edilen çoklu açık ocak optimizasyon sonuçları entegre edilerek belirsizliği temsil eden bir olasılık modeli geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin bakır-çinko yataklarına uygulanmasından elde edilen sonuçlara göre, bakır fiyatlarındaki değişkenlik nedeniyle, açık işletme optimizasyon sonuçlarında önemli bir belirsizliğin bulunduğu gözlemlenmiştir.

Burgarelli vd. (2018), maden projelerinin jeolojik, operasyonel ve piyasa belirsizliklerinden oluştuğunu ve mühendislerin amaçlarından bir tanesinin bu

belirsizlikleri azaltmak olduğundan bahsetmektedir. Bu çalışmada piyasa belirsizliğinin maden faaliyetleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Demir cevher fiyatı simüle edilerek BÇS üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Yarmuch, Brazil, Rubinstein ve Thomas (2021), açık ocaklardaki yolların ve minimum ocak genişliğinin hesaba katılmadığı üretim planı optimizasyonlarını yarı optimizasyon olarak tanımlandığından bahsetmektedir. Bu operasyonel kısıtların da hesaba katıldığı yeni bir optimizasyon modeli sunmuşlardır.

Blom, Pearce ve Stuckey (2018), çalışmalarında eşit büyüklükte üretim periyotları oluşturan bir karışık tamsayı programlama modeli sunmuşlardır.

Upadhyay ve Askari-Nasab (2018), kısa vadeli üretim planlaması için madencilik operasyonlarındaki belirsizlikleri hesaba katan bir simülasyon optimizasyon aracı sunmuşlardır. Bir demir madeninde yaptıkları çalışmayı uygulamışlardır.

Azzamouri, Féries, Fontane ve Giard (2018), faaliyet yürütülecek parsellerin seçimine ve makinelerin farklı temel operasyonlara tahsisine ilişkin taktik ve operasyonel kararlardan cevher arzının nasıl etkilendiğini test etmek için karışık tamsayı programlama tabanlı ayırık olay simülasyonuna dayalı bir model geliştirmişlerdir.

Blom, Pearce ve Stuckey (2019), yaptıkları incelemede, literatürde kısa dönem üretim planlamasıyla ilgili orta ve uzun dönem üretim planlamasına kıyasla çok daha çalışma olduğundan bahsetmişlerdir. Bu doğrultuda literatürde yer alan kısa dönem üretim planlamasıyla ilgili matematiksel ve buluşsal yöntemleri değerlendirmişlerdir.

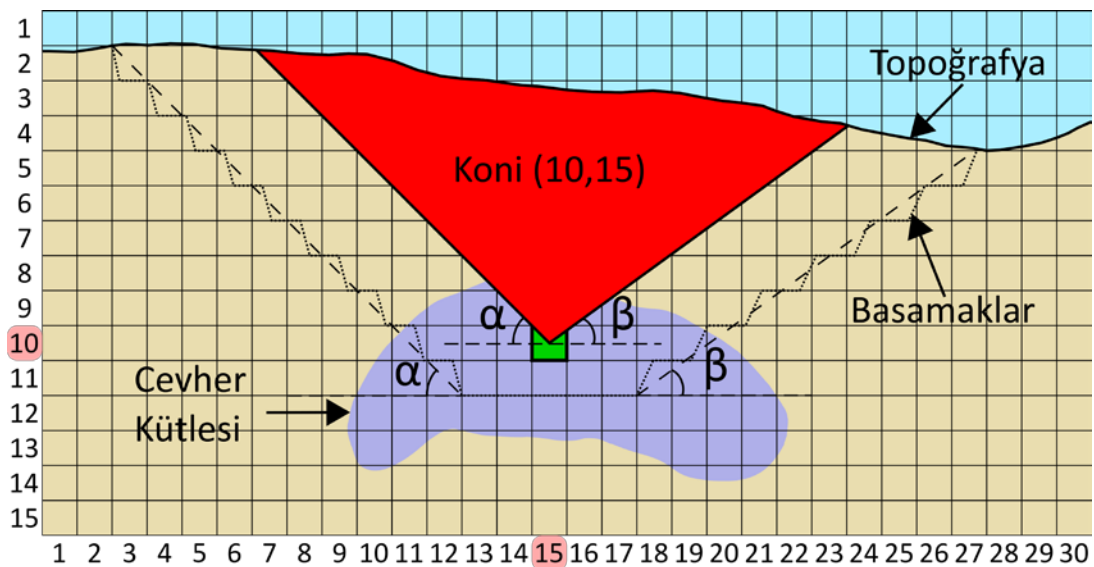
## **2.2 Hareketli Koni Algoritması Özeti**

Açık işletme madenciliğinde nihai ocak sınırının tespit edilmesinde kullanılan bir diğer yöntem hareketli koni algoritmasıdır. Bu yöntem ilk olarak Carlson, Erickson, O'Brain ve Pana (1966) tarafından uygulanmıştır. Yöntemin ana prensibi; tepe noktaları EBM'deki her bir cevher bloğunun merkezini işaret eden, tabanlarının ise topoğrafya olduğu konilerin oluşturulmasına dayanmaktadır. Konilerin kenar açısı ise

sahanın jeolojik parametrelerine bağı olarak şev stabilitesi analizleriyle tespit edilen genel şev açısına eşit olarak seçilmektedir.

Algoritma, EBM'nin en üst seviyesinde bulunan cevher bloğunun değerlendirilmesiyle başlamaktadır ve tüm cevher bloklarının incelenmesiyle sona ermektedir. İlk adımda KED'ler hesaplanmaktadır. Bir koninin ekonomik değeri; merkez noktaları koni sınırları içerisinde olan cevher ve dekapaj bloklarının toplam ekonomik değerine eşittir. Eğer bir koninin ekonomik değeri pozitif ise, bu koni ekonomik olarak çıkarılabilir demektir ve nihai ocak sınırına dahil edilmektedir. Ekonomik değeri pozitif olan tüm konilerin ocak sınırına dahil edilmesi sonucunda elde edilen sınır, nihai ocak sınırıdır.

Şekil 2.1'de iki boyutlu bir EBM'de örnek bir koni görseli yer almaktadır. EBM'deki blokların konumu, matristeki satır ve sütun numaralarıyla isimlendirilmektedir. Şekil 2.1'de yeşil olarak öne çıkarılan cevher bloğu 10. satır ve 15. sütunda yer aldığı için cevher bloğu (10, 15) olarak tanımlanmaktadır. Bu cevher bloğunun konisi ise koni (10, 15)'tir. Koni (10, 15) içerisinde yer alan (kırmızı bölge) tüm blokların toplam ekonomik değeri bu koninin ekonomik değeridir.  $\alpha$  ve  $\beta$  ise koninin açısıdır. Sahanın jeolojik koşullarına bağı olarak genel şev açısı sahanın bölgelerinde farklı seçilebilmektedir.



Şekil 2.1 İki boyutlu EBM'de örnek bir koni

Hareketli koni algoritması her senaryoda en yüksek ekonomik değerin elde edildiği ocak sınırının tespit edilmesini matematiksel olarak garanti edememektedir. Ayrı ayrı çıkarılma durumu değerlendirildiğinde ekonomik olmayan koniler, ortak dekapaj bloğuna sahip olmaları durumunda birlikte çıkarıldığında ekonomik sonuç verebilmektedir. Konilerin birlikte çıkarılması durumu temel hareketli koni algoritmasında incelenmemektedir. Bu eksikliğin giderilebilmesi ve böylece daha yüksek ekonomik değere sahip ocak sınırlarının tespit edilebilmesi için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Elahi, Kakaie ve Yusefi, 2012; Wright, 1999). Fakat yapılan bu geliştirmelere rağmen hareketli koni algoritması yeni fikirlerle geliştirilmelidir.



## BÖLÜM 3

### YÖNTEM

#### 3.1 Giriş

Çalışmanın ilk amacı mevcut hareketli koni algoritmaları değerlendirilerek yapılacak gelişmelerle her senaryoda nihai ocak sınırını doğru olarak tespit edebilen bir algoritma ortaya koymaktır. Bu doğrultuda Elahi, Kakaie ve Yusefi (2012) tarafından sunulan hareketli koni III algoritmasındaki eksiklikler giderilmeye çalışılmıştır. Özellikle ortak dekapaj bloğu bulunan konilerinin birlikte çıkarılması durumundaki koni çıkarılma sıralamasında iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Ek olarak ekonomik koni ya da konilerin tespit edilmesi halinde yeni değerlerle algoritmanın tekrar baştan başlaması sağlanarak daha isabetli sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın diğer amacı ise nihai ocak sınırında yer alan blokların çıkarılma sıralaması ve üretim ve dekapaj miktarını optimize ederek NBD'yi maksimize eden ve uygulanabilir bir üretim planı ortaya koymaktır. Geleneksel yöntemde kullanılan ve Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından tanıtılan parametrik analiz yöntemiyle iç içe ocak sınırları oluşturulmaktadır. Bu iç içe ocak sınırlarının değerlendirilmesiyle en uygun BÇS belirlenmektedir. Üretim periyotlarının sınırları her bir dönemdeki üretim miktarı ve yapılacak dekapaj miktarının kontrol edilmesiyle oluşturulmaktadır.

#### 3.2 Bloğun Ekonomik Değerinin Belirlenmesi

Bir BED'yi temelde iki değer belirlemektedir. Bunlar gelir değeri ve gider değeridir. Cevher içeren blokların gelir ve gider parametreleriyle, cevher içermeyen blokların ise sadece gider parametreleriyle ekonomik değeri tespit edilmektedir. Bir BED'nin hesaplanması Eşitlik 3.1'de verilmektedir.

$$\text{Blok Ekonomik Değeri} = \text{Gelirler} - \text{Giderler} \quad (3.1)$$

Gelir ve gider parametreleri, Gu, Wang ve Shu (2010) tarafından formülasyon olarak ifade edilmiştir. Aşağıda gelir ve gider parametreleri verilmektedir.

Bir bloğun hacmi ( $m^3$ ) (BH): Bir bloğun uzunluk, genişlik ve yükseklik değeriyle hesaplanmaktadır.

Bir cevher bloğunun ağırlığı (ton) (CBA): Blok hacminin bloğun yoğunluğuyla çarpılması sonucu blok ağırlığı tespit edilmektedir.

Bloğun tenörü (%) (T): Bir bloğun ağırlıkça içerdiği cevher miktarıdır.

Konsantre fiyatı (\$/ton) (F): Cevher zenginleştirme işlemlerinden sonra elde edilen konsantrenin satış fiyatıdır.

Metal kazanma verimi (%) (MKV): Cevher zenginleştirme işlemleri sonrasında elde edilen konsantre miktarının, zenginleştirme öncesi tüvenan cevher miktarına oranıdır.

Zenginleştirme verimi (%) (ZV): Cevher zenginleştirme işlemleri sırasında yaşanan kayıpların hesaba katılmasıyla çıkan cevher miktarının giren cevher miktarına oranıdır.

Konsantre yüzdesi (%) (KY): Zenginleştirme işlemleri sonrası elde edilen konsantrenin metal içeriğidir.

Seyrelme yüzdesi (%) (SY): Delme-patlatma gibi madencilik operasyonları esnasında yan kayacın cevher bloğuna karışması durumudur.

Cevher kazı maliyeti (\$/ton) (CKM): Cevher bloğunun sahadan çıkarılması için gereken madencilik operasyonları ve nakliye giderlerinin toplamıdır.

Zenginleştirme maliyeti (\$/ton) (ZM): Çıkarılan cevherin zenginleştirme işlemleri maliyetidir.

Dekapaj kazı maliyeti (\$/m<sup>3</sup>) (DKM): Dekapaj bloklarının sahadan çıkarılma maliyetidir.

Yukarıda tanımlanan parametrelere ek olarak çalışma kapsamında deneysel olarak blok derinlik maliyeti BED hesabına dahil edilmiştir. Bir bloğun nakliye maliyeti maden sahasında bulunduğu derinlikle ilişkilidir. Madencilik operasyonlarının bulunduğu derinlik arttıkça yakıt sarfiyatı ve makine-ekipman döngü süreleri artmaktadır. Derinlik maliyeti cevher ve dekapaj bloklarının nakliye edilecekleri

mesafelerin ve nakliye için kullanılan makine-ekipmanların teknik özelliklerinin farklı olabilmesi sebebiyle ayrı ayrı ele alınmıştır.

Bir bloğun yüksekliği (m) (BY): Bloğun yüksekliğidir.

Bir bloğun bulunduğu seviye sayısı (Birimsiz) (BS): EBM matrisinde bloğun bulunduğu seviyedir.

Cevher derinlik maliyeti (\$/m) (CDM): Cevher blokları için hesaplanan derinlik maliyetidir.

Dekapaj derinlik maliyeti (\$/m) (DDM): Dekapaj blokları için hesaplanan derinlik maliyetidir.

Eşitlik 3.2’de bir cevher bloğunun gelir değerinin (CBG) hesaplanması, Eşitlik 3.3’te bir cevher bloğunun gider değerinin (CBM) hesaplanması, Eşitlik 3.4’te bir cevher bloğunun ekonomik değerinin (CBED) hesaplanması ve Eşitlik 3.5’te ise bir dekapaj bloğunun ekonomik değerinin (DBED) hesaplanması verilmektedir.

$$CBG = \frac{CBA \times T \times F \times MKV \times ZV}{KY} \quad (3.2)$$

$$CBM = CBA \times MKV \times (1 + SY) \times (CKM + ZM) + CDM \times BK \times BY \quad (3.3)$$

$$CBED = CBG - CBM \quad (3.4)$$

$$DBED = -BH \times DKM - DDM \times BS \times BY \quad (3.5)$$

### 3.3 Sınır Tenör Hesabı

Bir cevher bloğunun ekonomik değerini sıfır yapan tenör değeri sınır tenördür. Sınır tenörünün üzerinde bir tenöre sahip bloklar cevher bloğudur. Geriye kalan tüm bloklar dekapaj bloğudur. Sınır tenör değeri de derinliğe bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple cevher bloğu ekonomik değeri hesabında kullanılan deneysel derinlik maliyeti fonksiyonu, sınır tenör hesabında da kullanılmıştır. Sınır tenörün hesap formülasyonu, Eşitlik 3.5’te yer alan cevher bloğu ekonomik değeri hesabı formülasyonunda, blok

tenörünü denklemin sol tarafında bırakarak hesaplanmaktadır. Sınır tenörünün hesaplama (ST) formülasyonu Eşitlik 3.6'da verilmektedir.

$$ST = \frac{(CBA \times MKV \times (1 + SY) \times (CKM + ZM) + CDM \times BK \times BY) \times KY}{CBA \times F \times MKV \times ZV} \quad (3.6)$$

### 3.4 Geliştirilmiş Hareketli Koni Algoritmasıyla Nihai Ocak Sınırının Belirlenmesi

Bir EBM'de GHKA ile nihai ocak sınırın tespit edilebilmesi için cevher bloğundan en üst seviyedeki bloklara kadar cevher konisi oluşturulmalıdır. Koninin gelir ve gider değerleri karşılaştırılmalı, eğer sonuç pozitif ise nihai ocak sınırına dahil edilmelidir. Eğer bir cevher bloğu nihai ocak sınırına dahil edilmişse, inceleme yeni değerle geriye kalan cevher blokları için tekrar başlamalıdır.

Her bir cevher konisinin tek başına çıkarılma durumu incelendikten sonra, ortak dekapaj bloğu bulunan konilerin birlikte çıkarılma durumu incelenmelidir. Konilerin birlikte çıkarılma durumunun incelenmesi Carlson'ın algoritmasında yer almamaktadır. Elahi, Kakaie ve Yousefi (2012) çalışmalarında özellikle konilerin birlikte çıkarılma durumu hakkında önemli gelişmelere imza atmışlardır. Bloklara önem değeri atayarak bu sorunu çözmeyi amaçlamışlardır. Eğer bir blok, birden fazla cevher konisinin içinde yer alıyorsa, bu blok ortak blok olarak adlandırılmaktadır. Böylece her bir blok ortak veya ortak olmayan blok olarak sınıflandırılmaktadır. Bir cevher konisi içindeki ortak blokların sayısı koninin önem değeridir.

Şekil 3.1'de bir maden sahasındaki örnek dört cevher bloğu ve konileri yer almaktadır. Konilerin kesişim alanları olan Bölge 2, Bölge 3 ve Bölge 4'teki bloklar ortak bloklardır. Bölge 1, Bölge 5 ve Bölge 6'da yer alan bloklar ise ortak olmayan bloklardır. Bölge 2 ve Bölge 4'te yer alan bloklar iki adet koni içinde buldukları için bu bölgelerdeki her bir BÖD 2'dir. Aynı zamanda Bölge 3, üç koninin kesişim bölgesi olduğu için bu bölgedeki her bir BÖD 3'tür. Bölge 1, Bölge 5 ve Bölge 6'daki bloklar sadece bir koninin içinde yer aldıkları için önem değerleri sıfırdır.



değerleri 2'dir. Eğer bir cevher bloğunun etkisiz olduğu tespit edilmişse, güncel durumda geriye kalan cevher bloklarının yeniden etkisiz olup olmadığı araştırılmalıdır. Bu işlem EBM'de yeni bir etkisiz cevher bloğu tespit edilmeyene kadar tekrar edilmelidir.

Eşitlik 3.7'de, Elahi, Kakaie ve Yousefi (2012) tarafından sunulan konilerin birlikte çıkarılması durumunda belirlenmesi gereken koni sıralaması formülasyonu verilmektedir. KÖD, bir cevher konisi içinde kalan blokların toplam önem değeridir. KED ise bu koninin içinde kalan tüm blokların toplam ekonomik değeridir. NÖD ise koni sıralaması için kullanılır ve aynı zamanda koninin önem değeridir.

$$NÖD_{koni} = \frac{KÖD_{koni}}{|KED_{koni}|} \quad (3.7)$$

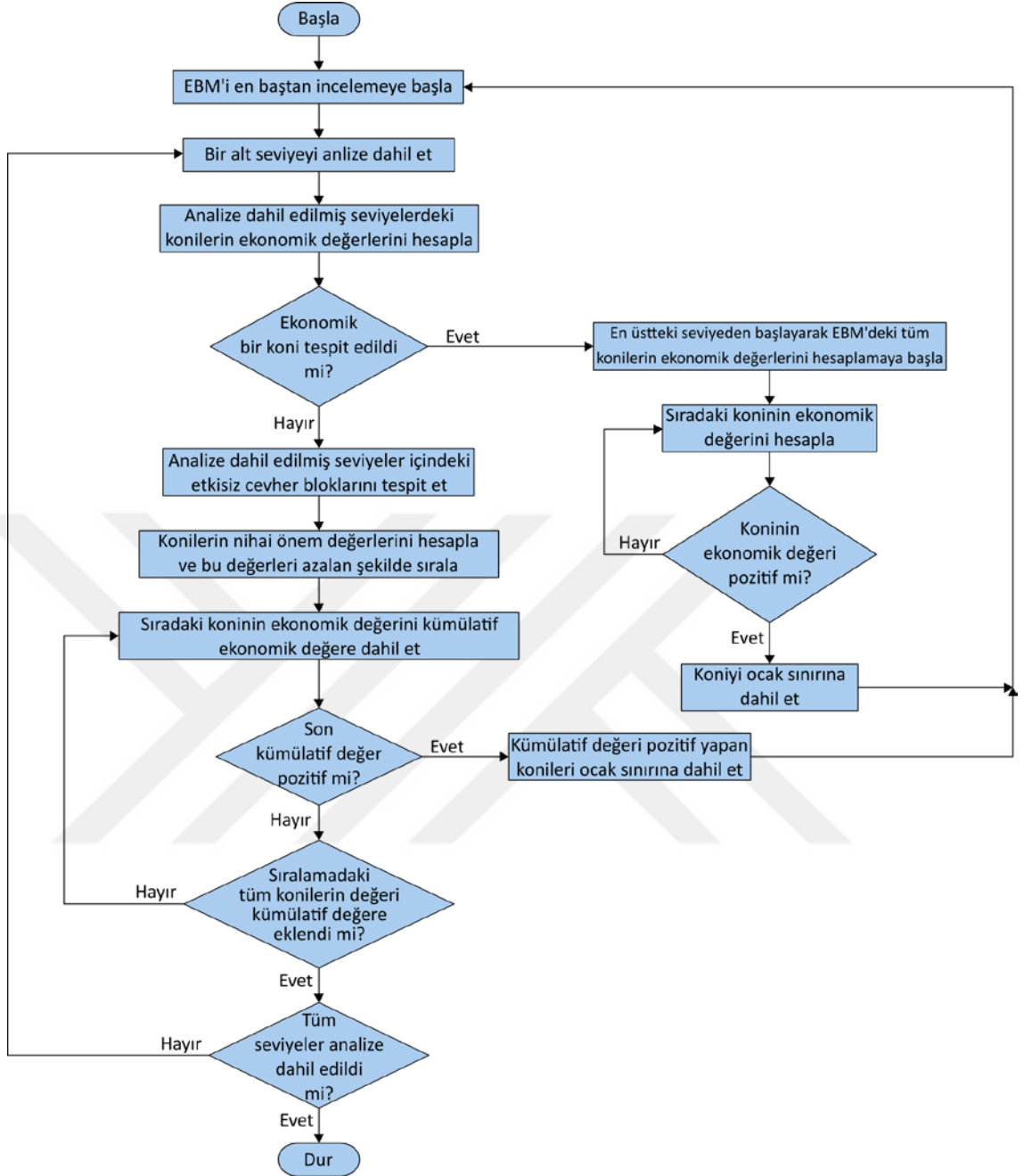
Konilerin birlikte çıkarılması durumu incelenirken EBM'nin ilk olarak sadece ilk seviyedeki bloklar incelenmelidir. Alt seviyelerdeki cevher blokları ihmal edilmelidir. İlk seviyenin incelemesi tamamlandıktan sonra ikinci seviye analize ilave edilmelidir. Bu durumda ilk iki seviyede yer alan blokların birlikte çıkarılması durumu incelenmelidir. Tüm seviyeler sırasıyla analize ilave edilinceye kadar ve inceleme tamamlanana kadar devam edilmelidir. İncelemenin herhangi anında ekonomik koni birlikteliği tespit edilirse, bu koniler nihai ocak sınırına dahil edilmelidir. Ayrıca incelemenin devamında nihai ocak sınırına dahil edilen konilerdeki BED'ler sıfır olarak kabul edilmelidir. Çünkü nihai ocak sınırına dahil edilmiş bloklar artık hava bloğudur. Ek olarak, nihai ocak sınırına dahil edilen koni olması durumunda işlem yeni blok değerleriyle en baştan tekrar başlamalıdır.

Konilerin birlikte çıkarılması durumu incelemesinin ilk adımı inceleme yapılan seviyelerdeki cevher bloğu konilerinin NÖD'leri tespit edilmelidir. İkinci adımda koniler NÖD'lerine göre azalan şekilde sıralanmalıdır. Üçüncü adımda sıralamaya göre konilerin kümülatif ekonomik değeri hesaplanmalıdır. Bu adımda dikkat edilmesi gereken nokta, bir ortak bloğun ekonomik değeri, kümülatif KED hesabında sadece bir kere kullanılmalıdır.

Sıralamaya göre kümülatif koni değerlerinin hesaplanması esnasında, kümülatif KED pozitif değere ulaşırsa, hesaplama son dahil edilen koni ve sıralamada bu koniye kadar olan tüm koniler nihai ocak sınırına dahil edilmelidir. Nihai ocak sınırı güncellendiği için sıralamada geriye kalan blokların kümülatif ekonomik değeri hesaplanmamalıdır. Yeni ekonomik blok değerleriyle algoritma en baştan başlamalıdır.

GHKA'nın anlaşılabilirliğini arttırmak için algoritmanın akım şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.





Şekil 3.2 GHKA'nın akım şeması

### 3.4.1 Blok Çıkarılma Sıralamasında Yapılan Geliştirmeler

Eşitlik 3.7'de, eğer bir koninin ekonomik değeri sıfır olursa, NÖD belirsiz olmaktadır. Bu durumda koninin sıralamada nerede yer alacağı belirsizdir. KED'nin sıfır olma ihtimaliyle karşılaşılması durumunda hareketli koni III algoritmasının izleyeceği yol tanımlı değildir. Konilerin birlikte çıkarılması incelenirken en önemli

nokta konilerin çıkarılma sıralamasının belirlenmesidir. En uygun sıralamanın tespit edilememesi, gerçek çözümden uzaklaşılmasına sebep olmaktadır.

Eşitlik 3.7’de, bir koni değerinin sıfır olması koninin ekonomik olarak çıkarılma ihtimalinin yüksek olduğu anlamını taşımaktadır. Bu sebep koni değeri sıfır olan koniler kendi için KÖD’lerine göre azalan şekilde sıralanmalıdır. Elde edilen bu sıralama, NÖD sıralamasına dahil edilmelidir. KED’si sıfır olan koniler NÖD sıralamasında en başta yer almalıdır. Eğer konilerin NÖD’leri eşit ise, KED’si yüksek olan koni önce çıkarılmalıdır.

### 3.4.2 Bağımlı Koni Konusunda Yapılan Geliştirmeler

Hareketli koni III algoritmasında, içerisinde ortak blok bulunduran koniler bağımlı koniler olarak adlandırılmaktadır. Eğer koninin içerisinde ortak blok yoksa, koni bağımsız konidir. Şekil 3.1’de, cevher bloğu 1, cevher bloğu 2 ve cevher bloğu 3 konileri bağımlı konilerdir. Cevher bloğu 4’ün konisi ise bağımsız konidir.

Bağımlı konilerin tek başına ekonomik olarak çıkarılıp çıkarılamayacağı durumu hareketli koni III algoritmasında incelenmemektedir. Bu durum gerçek çözümden uzaklaşmaya sebep olabilmektedir. Örnek olarak Şekil 3.3’te, genel şev açısı olan iki boyutlu EBM için en yüksek kârın elde edildiği nihai ocak sınırı hareketli koni III algoritmasıyla oluşturulamamaktadır.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
2	-2	+3	+8	-2	-2	+3	+3	+3	-2

Şekil 3.3 Örnek bir iki boyutlu EBM

Hareketli koni III algoritmasının ilk adımında bağımsız ve ekonomik koniler aranmakta ve tespit edilmesi durumunda ocak sınırına dahil edilmektedir. Şekil 3.1’deki cevher bloğu konilerinin tamamı bağımlı konilerdir. İkinci adımda etkisiz cevher blokları tespit edilmektedir. Bunun için koninin ortak olmayan

bölgelerindeki blokların ve koninin tepe noktasında yer alan kaynak cevher bloğunun blok ekonomik değerleri toplanmalıdır.

Bir EBM matrisinde  $i$  satır numarası,  $j$  sütun numarası olsun.  $koni_{i,j}$ ,  $i$  numaralı satırdaki,  $j$  numaralı sütundaki koniyi ifade etmektedir. Aynı şekilde,  $blok_{m,n}$ ,  $m$  numaralı satırdaki,  $n$  numaralı sütundaki bloğu ifade etmektedir. Aynı şekilde,  $BED_{m,n}$  ise  $m$  numarası satırdaki,  $n$  numaralı sütundaki BED'yi göstermektedir.  $A_{m,n}$  ise aşağıdaki kural ilerle belirlenen bir reel sayı olsun.

$$A_{m,n} = \begin{cases} BED_{m,n} & \text{eğer } blok_{m,n} \text{ bir ortak blok ise,} \\ 0 & \text{değilse.} \end{cases}$$

Eşitlik 3.8'de, bir cevher bloğunun etkisiz olup olmadığını belirleyen formülasyon verilmektedir. Tablo 3.1'de ise, Şekil 3.3'teki EBM'deki cevher blokları için hesaplanan ECBD'ler yer almaktadır.

$$ECBD_{i,j} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=j+m-i}^{j+i-m} A_{m,n} \quad (3.8)$$

Tablo 3.1 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.3'te verilen EBM'deki cevher blokları için ECBD'ler

Koni No.	ECBD
(2, 2)	+1
(2, 3)	+6
(2, 6)	+1
(2, 7)	+3
(2, 8)	+1

Tablo 3.1'deki ECBD'ler incelendiğinde  $ECBD \leq 0$  koşulunu sağlayan cevher bloğu olmadığı için verilen EBM'de etkisiz cevher bloğu yoktur. Sonraki adımda BÖD'ler hesaplanmaktadır. Şekil 3.4'te BÖD'ler verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2	2	0	0	2	3	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.4 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.3'te verilen EBM'deki BÖD'ler

Bu aşamada konilerin birlikte çıkarılması durumunun incelenmesi için KÖD'lerin, KED'lerin ve NÖD'lerin hesaplanması gerekmektedir. Eşitlik 3.9'da KÖD'nin, Eşitlik 3.10'da ise KED'nin hesabını matematiksel olarak gösteren formülasyonlar verilmektedir.

$$KÖD_{i,j} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=j+m-i}^{j+i-m} BÖD_{m,n} \quad (3.9)$$

$$KED_{i,j} = \sum_{m=1}^i \sum_{n=j+m-i}^{j+i-m} BED_{m,n} \quad (3.10)$$

Tablo 3.2'de, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin NÖD'lerine göre azalan şekilde çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler verilmektedir.

Tablo 3.2 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(2, 7)	7	-3	2.33	-3
2	(2, 3)	4	+2	2.00	-2
3	(2, 6)	5	-3	1.67	-1
4	(2, 8)	5	-3	1.67	+1
5	(2, 2)	4	-3	1.33	+2

Tablo 3.2'ye göre, en yüksek kümülatif değer 5. koninin çıkarılması sonucunda elde edildiği görülmektedir. Bu durumda sıralamadaki ilk 5 koni ocak sınırına dahil edilmelidir. Hareketli koni III algoritmasıyla elde edilen ocak değeri +2'dir ve bulunan

ocak sınırı Şekil 3.5’te verilmektedir. Elde edilen bu ocak değeri Şekil 3.3’teki EBM için tespit edilebilecek en yüksek kâr değeri değildir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
2	-2	+3	+8	-2	-2	+3	+3	+3	-2

Şekil 3.5 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.3’te verilen EBM için bulunan nihai ocak sınırı

GHKA’ya göre ise, ilk adımda KED’ler Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmalıdır. Eğer  $KED > 0$  koşulunu sağlayan koniler ocak sınırına dahil edilmelidir. Tablo 3.3’te KED’ler verilmektedir. Tablo 3.3’e göre  $koni_{2,3}$  ocak sınırına dahil edilmelidir. Ocak sınırına koni dahil edildiği için EBM’deki blok ekonomik değerleri güncellenmelidir. Güncel EBM Şekil 3.6’da verilmektedir.

Tablo 3.3 GHKA’ya göre Şekil 3.3’te verilen EBM’deki KED’ler

Koni No.	KED
(2, 2)	-3
(2, 3)	+2
(2, 6)	-3
(2, 7)	-3
(2, 8)	-3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-2	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2
2	-2	+3	0	-2	-2	+3	+3	+3	-2

Şekil 3.6 GHKA’ya göre, güncel blok ekonomik değerleri

Ocak sınırına koni dahil edildiği için blok ekonomik değerleri güncellenmeli ve algoritma en baştan güncel verilerle başlamalıdır. Geriye kalan cevher blokları için KED’ler hesaplanmalıdır. Tablo 3.4’e göre,  $koni_{2,2}$  ocak sınırına dahil edilmelidir. Güncel blok ekonomik değerleri Şekil 3.7’de verilmektedir.

Tablo 3.4 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için güncel KED'leri

Koni No.	KED
(2, 2)	+1
(2, 6)	-3
(2, 7)	-3
(2, 8)	-3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2
2	-2	0	0	-2	-2	+3	+3	+3	-2

Şekil 3.7 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri

Ocak sınıra tekrar yeni bir koni dahil edildiği için yeni blok ekonomik değerleriyle algoritma en baştan başlamalıdır. Geriye kalan cevher bloklarının KED'leri hesaplanmalıdır. Güncel KED'ler Tablo 3.5'te verilmektedir. Tablo 3.5 incelendiğinde, KED'si pozitif olan cevher bloğu olmadığı için konilerin birlikte çıkarılması durumu incelenmeye başlanmalıdır. Bu aşamada ilk olarak etkisiz cevher bloğu tespiti yapılmalıdır. Tablo 3.5'e göre, tüm konilerin ECBD'leri pozitif olduğu için güncel EBM'de etkisiz cevher bloğu bulunmamaktadır. Bir sonraki aşamada BÖD'ler hesaplanmalıdır. Şekil 3.8'de BÖD'ler verilmektedir.

Tablo 3.5 GHKA'ya göre, güncel KED'ler ve etkisiz cevher bloğu değerleri

Koni No.	KED	ECBD
(2, 6)	-3	+1
(2, 7)	-3	+3
(2, 8)	-3	+1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	2	3	2	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.8 GHKA'ya göre BÖD'ler

BÖD'ler tespit edildikten sonra KÖD'ler, KED'ler ve NÖD'ler koni çıkarılma sıralamasını belirlemek için hesaplanmalıdır. Tablo 3.6'da, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin NÖD'lerine göre azalan şekilde çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler verilmektedir.

Tablo 3.6 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(2, 7)	7	-3	2,33	-3
2	(2, 6)	5	-3	1,67	-2
3	(2, 8)	5	-3	1,67	-1

Tablo 3.6 incelendiğinde pozitif kümülatif değer koni çıkarılma sıralamasının herhangi bir aşamasında elde edilememiştir. Tüm seviyelerdeki blokların incelemesi tamamlandığı ve ocak sınırı güncellenmediği için algoritma burada sona ermektedir. GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için elde edilen kâr değeri +3'tür. Bu elde edilebilecek en yüksek değerdir. Tespit edilen nihai ocak sınırı Şekil 3.9'da verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
2	-2	+3	+8	-2	-2	+3	+3	+3	-2

Şekil 3.9 GHKA'ya göre, Şekil 3.3'te verilen EBM için tespit edilen ve en yüksek kâr değerini veren nihai ocak sınırı

### 3.4.3 Konilerin Birlikte Çıkarılması Durumu İncelenmesinde Konilerin Kümülatif Ekonomik Değerinin Yorumlanmasında Yapılan Geliştirmeler

Tek başına değerlendirildiğinde ekonomik olarak çıkarılamayan ve içerisinde ortak blokların yer aldığı konilerin değerlendirilmesi temel hareketli koni algoritmasında yer almamaktadır. Hareketli koni III algoritmasında bu konilerin birlikte çıkarılma durumunun araştırıldığı adımda, koni çıkarılma sıralamasında en yüksek pozitif kümülatif değer elde edildiği koni ve sıralamada bu koniye kadar olan koniler ocak sınırına dahil edilmektedir. Fakat en yüksek kümülatif değere göre karar vermek hatalı sonuçlara sebep olabilmektedir.

Hareketli koni algoritmasının genel mantığında göre kârlı koni bulunduğu anda ocak sınırına dahil edilmesi yer almaktadır. En yüksek kümülatif değeri elde etmeye amaçlamak yerine, sıralamada kümülatif KED'nin ilk pozitif değere ulaştığı durumdaki konilerin ocak sınırına dahil edilmesi daha isabetli sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca ocak sınırına yeni koniler dahil edildiği için bu sınıra dahil edilen blokların, EBM'deki yeni BED sıfır olmalıdır ve güncel değerlerle algoritma en baştan başlamalıdır.

Hareketli koni III algoritmasının en yüksek pozitif kümülatif değeri elde etmeyi amaçlaması sonucu gerçek nihai ocak sınırını tespit edememesini açıklayan iki boyutlu örnek EBM Şekil 3.10'da verilmektedir. Örnekteki nihai ocak sınırı tespiti ilk olarak hareketli koni III algoritmasına göre, ardından çalışma kapsamında geliştirilen gelişmiş hareketli koni algoritmasına göre oluşturulacaktır. Örnekteki model için genel şev açısı  $45^\circ$ 'dir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
2	-6	+11	+9	-6	-6	+7	+7	-6	+1	-6
3	-6	-6	-6	-6	-6	+18	+18	+4	-6	-6

Şekil 3.10 Örnek bir iki boyutlu EBM

Hareketli koni II algoritmasına göre, ilk adım EBM'nin ilk seviyesini analize dahil etmektir. Bu seviyede cevher bloğu yer almadığı için direkt olarak ikinci seviye analize dahil edilmektedir. Bu aşamada bağımsız cevher konilerinin ekonomikliği araştırılmaktadır. İlk iki seviyede bağımsız koni yer almadığı için bir sonraki aşama olan konilerin birlikte çıkarılması durumunu incelemeye geçilmektedir.

Konilerin birlikte çıkarılması aşamasında ilk olarak etkisiz cevher blokları tespit edilmektedir. Eşitlik 3.8'e göre hesaplanan ECBD'ler Tablo 3.7'de yer almaktadır.

Tablo 3.7 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.10'da verilen EBM'deki cevher blokları için ECBD'ler

Koni No.	ECBD
(2, 2)	+5
(2, 3)	+3
(2, 6)	+1
(2, 7)	+7
(2, 9)	-11

İlk iki seviyenin incelenmesinde Tablo 3.7'ye göre  $koni_{2,9}$  etkisiz cevher bloğudur. Çünkü  $ECBD_{2,9} \leq 0$  koşulu sağlanmaktadır. Etkisiz cevher bloğu tespit edildiği için, bu cevher bloğunun konisi içindeki ortak blokların önem değeri, bu koninin etkisini kaldırmak için 1 azaltılmalıdır. Aynı şekilde geriye kalan konilerin güncel ECBD'ler hesaplanmalıdır. Güncel ECBD'ler Tablo 3.8'de verilmektedir.

Tablo 3.8 Hareketli koni III algoritmasına göre Şekil 3.10'da verilen EBM'deki cevher blokları için güncel ECBD'ler

Koni No.	Güncel ECBD
(2, 2)	+5
(2, 3)	+3
(2, 6)	+1
(2, 7)	+1

Tablo 3.8 incelendiğinde tespit edilen yeni etkisiz cevher bloğu olmadığı görülmektedir. Bu durumda sonraki aşama olan konilerin birlikte çıkarılması incelenmelidir. BÖD'ler Şekil 3.11'de verilmektedir. Ayrıca koni sıralaması ve kümülatif KED'ler Tablo 3.9'da verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2	2	0	0	2	2	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.11 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için, ilk iki seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları

Tablo 3.9 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(2, 2)	4	-7	0,57	-7
2	(2, 3)	4	-9	0,44	-4
3	(2, 6)	4	-11	0,36	-15
4	(2, 7)	4	-11	0,36	-14

Hareketli koni III algoritmasına göre, Tablo 3.9 incelendiğinde, en yüksek kümülatif değer pozitif olmadığı görülmektedir. Bu sebeple hiçbir koni ocak sınırına dahil edilmemelidir. Analize bir sonraki seviye dahil edilerek devam edilmelidir.

İlk üç seviyede bağımsız cevher bloğu olmadığı için bir sonraki aşamaya geçilmelidir. Bu aşamada etkisiz cevher blokları aranmaktadır. Eşitlik 3.8'e göre hesaplanan ECBD'ler Tablo 3.10'da verilmektedir.

Tablo 3.10 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk üç seviyede yer alan cevher blokları için ECBD'ler

Koni No.	ECBD
(2, 2)	+5
(2, 3)	+9
(2, 6)	+7
(2, 7)	+7
(2, 9)	+1
(3, 6)	+12
(3, 7)	+18
(3, 8)	+4

Tablo 3.10 incelendiğinde tespit edilen yeni etkisiz cevher bloğu olmadığı görülmektedir. Bu durumda sonraki aşama olan konilerin birlikte çıkarılması incelenmelidir. BÖD'ler Şekil 3.12'de verilmektedir. Ayrıca koni sıralaması ve kümülatif KED'ler Tablo 3.11'de verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2	2	2	3	5	5	5	3	2
2	0	0	0	0	0	3	4	2	2	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.12 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için, ilk üç seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları

Tablo 3.11 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk üç seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(3, 7)	30	-4	7,50	-4
2	(3, 6)	27	-4	6,75	+2
3	(2, 7)	19	-11	1,73	+2
4	(2, 6)	16	-11	1,45	+2
5	(3, 8)	28	-24	1,17	+1
6	(2, 9)	12	-17	0,71	+1
7	(2, 3)	6	-9	0,67	-2
8	(2, 2)	4	-7	0,57	+3

Hareketli koni III algoritmasına göre, en yüksek kümülatif KED'nin sekizinci koninin çıkarılmasından sonra elde edildiği görülmektedir. Bu koniler ocak sınırına dahil edilmektedir. Üçüncü seviye Şekil 3.10'da verilen EBM'nin son seviyesi olduğu için algoritma bu aşamada sona ermektedir. Hareketli koni III algoritmasına göre elde edilen ocak kârı +3'tür. Ayrıca oluşturulan ocak sınırı Şekil 3.13'te verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
2	-6	+11	+9	-6	-6	+7	+7	-6	+1	-6
3	-6	-6	-6	-6	-6	+18	+18	+4	-6	-6

Şekil 3.13 Hareketli koni III algoritmasına göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için bulunan nihai ocak sınırı

GHKA'ya göre ise, en yüksek kümülatifin elde edildiği sıralama yerine ilk pozitif kümülatifin elde edildiği sıralama ocak sınırına dahil edilmeli ve güncel değerlerle

algoritma kalan cevher blokları için en baştan tekrar başlamalıdır. Tablo 3.11 tekrar incelendiğinde ilk pozitif kümülatif KED'nin ikinci sıradaki  $koni_{3,6}$ 'nın çıkarılması sonucunda elde edildiği görülmektedir. İlk iki koni ocak sınırına dahil edilmelidir. Güncel blok ekonomik değerleri Şekil 3.14'te verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-6	-6	-6	0	0	0	0	0	0	-6
2	-6	+11	+9	-6	0	0	0	0	+1	-6
3	-6	-6	-6	-6	-6	0	0	+4	-6	-6

Şekil 3.14 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri

Bu aşamada ilk seviye analize dahil edilmelidir. Bu seviyede cevher bloğu yer almadığı için sıradaki seviye analize dahil edilmelidir. İkinci seviyede cevher blokları yer almaktadır. Bu blokların KED'leri Eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanmalıdır. Tablo 3.12'de hesaplanan KED'ler verilmektedir.

Tablo 3.12 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için ilk iki seviyede yer alan konilerin KED'leri

Koni No.	KED
(2, 2)	-7
(2, 3)	-3
(2, 9)	-5

Tablo 3.12 incelendiğinde ekonomik değeri pozitif olan koni yer almadığı görülmektedir. İlk iki seviye için Eşitlik 3.8 kullanılarak etkisiz cevher blokları aranmalıdır. Tablo 3.13'te etkisiz cevher bloğu değerleri verilmektedir.

Tablo 3.13 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk iki seviyede yer alan cevher blokları için ECBD'ler

Koni No.	ECBD
(2, 2)	+5
(2, 3)	+9
(2, 9)	-5

Tablo 3.13'e göre  $blok_{2,9}$  etkisiz cevher bloğudur. Bu bloğun ortak blok tespitindeki etkisi kaldırılarak yeni ECBD'ler hesaplanmalıdır. Güncel ECBD'ler Tablo 3.14'te verilmektedir.

Tablo 3.14 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM'deki ilk iki seviyede yer alan cevher blokları için güncel ECBD'ler

Koni No.	Güncel ECBD
(2, 2)	+5
(2, 3)	+9

Tablo 3.14 incelendiğinde tespit edilen yeni etkisiz cevher bloğu olmadığı görülmektedir. Sonraki aşamada BÖD'ler belirlenmelidir. Şekil 3.15'te ilk iki seviye için BÖD'ler verilmektedir. Ayrıca koni sıralaması ve kümülatif KED'ler Tablo 3.15'te verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.15 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için, ilk iki seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları

Tablo 3.15 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk iki seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(2, 2)	4	-3	1,33	-3
2	(2, 3)	4	-7	0,57	+2

Tablo 3.15 incelendiğinde, ilk pozitif kümülatif koni değerinin ikinci sıradaki  $koni_{2,3}$ 'ün çıkarılması sonucunda elde edildiği görülmektedir.  $koni_{2,3}$  ve birinci sıradaki  $koni_{2,2}$  ocak sınırına dahil edilmelidir. Yeni koniler ocak sınırına dahil edildiği için blokların blok ekonomik değerleri güncellenmeli ve yeni değerlerle

algoritma en baştan başlamalıdır. Şekil 3.16’da güncel blok ekonomik değerleri verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6
2	-6	0	0	-6	0	0	0	0	+1	-6
3	-6	-6	-6	-6	-6	0	0	+4	-6	-6

Şekil 3.16 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için güncel blok ekonomik değerleri

İlk seviye analize dahil edilmelidir. İlk seviyede cevher bloğu olmadığı için bir sonraki seviye analize dahil edilmelidir. Bu aşamada tek cevher bloğu olan  $blok_{2,9}$  için Eşitlik 3.10 kullanılarak KED hesaplanmalıdır. Bu bloğun KED’si pozitif olmadığı ve ilk iki seviyede incelenmesi gereken başka cevher bloğu olmadığı için analize bir sonraki seviye dahil edilmelidir.

Bu aşamada ilk üç seviyenin KED’leri hesaplanmalıdır. Tablo 3.16’da hesaplanan KED’ler verilmektedir.

Tablo 3.16 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM için ilk üç seviyede yer alan konilerin KED’leri

Koni No.	KED
(2, 9)	-5
(3, 8)	-1

Tablo 3.16’ya göre pozitif KED’ye sahip cevher bloğu olmadığı için bir sonraki aşamada konilerin birlikte çıkarılması durumu incelenmelidir. Eşitlik 3.8 kullanılarak etkisiz cevher blokları tespit edilmelidir. Tablo 3.17’de etkisiz cevher bloğu değerleri verilmektedir.

Tablo 3.17 GHKA’ya göre, Şekil 3.10’da verilen EBM’deki ilk üç seviyede yer alan cevher blokları için ECBD’ler

Koni No.	ECBD
(2, 9)	+1
(3, 8)	+4

Tablo 3.17'ye göre tespit edilen yeni etkisiz cevher bloğu olmadığı görülmektedir. BÖD'ler Şekil 3.17'de verilmektedir. Ayrıca koni sıralaması ve kümülatif KED'ler Tablo 3.18'de verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2
2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 3.17 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için, ilk üç seviyenin incelenmesi sonucu elde edilen ortak blok sayıları

Tablo 3.18 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için konilerin birlikte çıkarılması durumunda, ilk üç seviye için konilerin çıkarılma sıralaması ve sıradaki koninin çıkarılması sonucu elde edilen kümülatif ekonomik değerler

Koni Çıkarılma Sırası	Koni No.	KÖD	KED	NÖD	Kümülatif Değer
1	(3, 8)	8	-1	8,00	-1
2	(2, 9)	8	-5	1,60	-1

Tablo 3.18'e göre pozitif kümülatif değerini elde edilemediği görülmektedir. Tüm seviyelerdeki cevher bloklarının incelenmesinin tamamlanmasından ve ocak sınırına yeni blok eklenmemesinden dolayı algoritma sona ermektedir. GHKA'ya göre elde edilen ocak kârı +4'tür. Ayrıca elde edilen ocak sınırı Şekil 3.18'de verilmektedir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
2	-6	+11	+9	-6	-6	+7	+7	-6	+1	-6
3	-6	-6	-6	-6	-6	+18	+18	+4	-6	-6

Şekil 3.18 GHKA'ya göre, Şekil 3.10'da verilen EBM için tespit edilen ve en yüksek kâr değerini veren nihai ocak sınırı

#### 3.4.4 Geliştirilmiş Hareketli Koni Algoritmasının Doğruluğunun Araştırılması

Çalışma kapsamında nihai ocak sınırı tespiti için geliştirilen algoritmanın mevcut hareketli algoritmasından daha isabetli sonuç üretmesinin ardından matematiksel

olarak doğruluğu araştırılmıştır. Bunun için tanınan profesyonel madencilik paket yazılımlarından olan Micromine kullanılmıştır. Micromine programında yer alan, nihai ocak sınırı tespiti ve üretim planlaması gerçekleştirebilen Pit Optimiser modülü kullanılmıştır. Pit Optimiser modülü nihai ocak sınırını belirleme algoritması olarak Lerchs ve Grossmann algoritmasını kullanmaktadır. Araştırmada kullanılan yazılımın sürümü 2021.5'tir.

EBM ve topoğrafya verileri elde edilen bir altın madenin nihai ocak sınırı GHKA ve Pit Optimiser ile belirlenmiştir. Aşağıda giriş parametreleri verilmektedir.

Toplam blok sayısı: 754 000

Yönlere göre blok sayıları: kuzey-güney 130, doğu-batı 145, derinlik 40

Toplam cevher bloğu sayısı: 19 727

Blok boyutları: 5 m × 5 m × 5 m kübik bloklar

Genel şev açısı: her yönde 45°

Karşılaştırma 50 m, 100 m, 150 m ve 200 m olmak üzere dört farklı derinlik için tekrarlanmıştır. Elde edilen çıkarılan toplam blok sayıları, toplam cevher ve dekapaj miktarları, örtü-kazı oranları ve net kâr bilgileri Tablo 3.19'da sunulmaktadır.

Tablo 3.19 GHKA ile Pit Optimiser modülünün nihai ocak sınırı tespitinin karşılaştırma sonuçları

	Ocak derinliği (m)	Çıkarılan blok sayısı	Dekapaj miktarı (bin m <sup>3</sup> )	Cevher miktarı (bin ton)	Örtü-kazı oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Net kâr (milyon Amerikan doları)
GHKA	50	188 500	671,50	810,94	0,83	55,62
Pit Optimiser	50	188 500	671,50	810,94	0,83	55,62
GHKA	100	377 000	2 499,25	1 993,75	1,25	115,50
Pit Optimiser	100	377 000	2 575,00	2 030,63	1,27	115,52
GHKA	150	565 500	4 806,25	3 459,69	1,39	152,58
Pit Optimiser	150	565 500	4 976,50	3 499,06	1,42	152,94
GHKA	200	754 000	7 332,25	4 663,75	1,57	176,98
Pit Optimiser	200	754 000	7 304,63	4 650,31	1,57	177,52

Tablo 3.19'daki sonuçlar incelendiğinde, ocak derinliği arttıkça iki program arasındaki net kâr farkı da artmaktadır. Buradan GHKA'daki koni çıkarılma

sıralamasının daha da geliştirmeye ihtiyacı olduğu anlaşılmaktadır. Fakat Tablo 3.19'daki çıkarılan blok sayılarına bakıldığında iki algoritmanın da tüm ocak derinlikleri için aynı sonucu verdiği görülmektedir. Çıkarılan blok sayıları aynıyken, cevher ve dekapaj miktarlarında farklılık olması Pit Optimiser'ın özellikle ocak sınırlarında yer alan blokların boyutlarında, en uygun sonucu elde etmek veya makine-ekipmanın blok köşelerinde randımanlı çalışmaması sebebiyle sivri köşeleri yumuşatma adına değişiklik yapmış olabileceği ve bu sebeple net kâr değerlerinde farklılık gözlemlenmiş olabileceği konusu araştırılmamıştır.

Paket program kullanmanın en büyük dezavantajlarından bir tanesi, kullanılan algoritmaların ticari kaygılar sebebiyle şeffaf olarak son kullanıcılarla paylaşılmamasıdır. Bu sebeple her araştırmacının yeterince müdahale edebildiği ve kolay anlaşılır algoritmalarla gerçekleştirilen fizibilite analizlerinin daha sağlıklı sonuçlar için uygun olduğu düşünülmektedir.

Nihai ocak sınırının doğru tespit edilebilmesi, sonrasında oluşturulacak olan üretim planlarını da etkileyecektir. Optimize edilmiş koni çıkarılma sıralaması sayesinde operasyonlar sonucu elde edilecek NBD'de artış olacaktır.

### **3.5 Periyot Sınırlarının Belirlenmesi**

Maden işletmesinin ömrü boyunca yapılacak olan dekapaj kazısı miktarı ve çıkarılacak olan cevher miktarı nihai ocak sınırına bağlıdır. Her periyot için sabit örtü-kazı oranıyla çalışıldığında, bir periyodun üretim kapasitesi, toplam çıkarılacak cevher miktarı ve periyot sayısı ile ilgilidir. Periyotlardaki üretim ve dekapaj miktarının sabit tutulması makine-ekipman sayısının da her bir dönemde sabit kalmasına imkân tanımaktadır. Bu sayede makine-ekipman veriminin maksimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple periyottaki örtü-kazı oranı, mümkün olduğunca nihai örtü-kazı oranıyla aynı ya da yakın olacak bir üretim planı ortaya konmalıdır.

### 3.5.1 İç İçe Ocak Sınırlarının Belirlenmesi

Üretim sınırlarının ve BÇS'nin belirlenmesi amacıyla Lerchs ve Grossmann (1965) parametrik analiz yöntemini sunmuşlardır. EBM'deki cevher bloklarının ekonomik değeri indirgeme faktörleriyle azaltılarak değerleri değiştirilmiş yeni bir EBM elde etmek mümkündür. Yeni EBM için ocak sınırı belirlendiğinde, elde edilen sınır, gerçek EBM için elde edilen sınırdan daha küçük olacaktır. Bunun başlıca sebebini açıklamak için  $m$ , ekonomik değeri pozitif olan bir cevher bloğu konisi olsun. Eğer bu koninin içinde yer alan cevher bloklarının ekonomik değeri, yeterli büyüklükte bir katsayıyla azaltılırsa, ekonomik değeri pozitif olan  $m$  konisi, yeni EBM'de tek başına çıkarılması ekonomik olmayacaktır. İndirgeme katsayısı EBM'deki tüm cevher bloklarına uygulandığında ise, değerleri değiştirilmemiş EBM'de ekonomik olarak çıkarılabilen cevher blokları yeni EBM'de oluşturulan sınırdan, bir kısmının ekonomik olarak çıkarılabildiği, bir kısmının ise çıkarılamadığı görülecektir. Bu sebeple yeni EBM ile tespit edilen ocak sınırı, gerçek EBM verileriyle elde edilen ocak sınırdan daha küçük olacaktır. Birden fazla ve farklı indirgeme faktörü kullanılarak farklı ocak sınırları oluşturmak mümkündür. Oluşturulan her bir ocak sınırının farklı boyutlarda olması beklenmektedir. Böyle oluşan farklı sınırlar iç içe geçecektir. Bu sebeple bu sınırlara iç içe ocak sınırları adı verilmektedir.

Oluşturulan iç içe ocak sınırları küçükten büyüğe sıralandığında ve bu sırayla blok çıkarılma işlemi gerçekleştiğinde, nihai ocak sınırının yüksek ekonomik değere sahip bölgelerindeki bloklar öncelikli olarak çıkarılmış olacaktır. Yüksek ekonomik değerini düşük ekonomik değere göre mümkün olan daha kısa sürelerde çıkarılması NBD'de artış sağlayacaktır. Böylece NBD maksimize edilmiş olacaktır.

İndirgeme faktörü  $f$  olsun. Gelir değeri  $a$ , maliyet değeri  $b$  olan bir koni için,  $f \times a > b$  koşulunu sağlayan her  $f$  değeri için bu koniyi çıkarmak ekonomik olacaktır. Bu sebeple, farklı indirgeme faktörüyle aynı ocak sınırını elde etmek mümkündür. Çalışmalarda indirgeme faktörleri sabit aralıklı olacak şekilde seçilmektedir.

Parametrik analiz yöntemiyle oluşturulan art arda iki ocak sınırı arasındaki cevher miktarı, hedeflenen periyot üretiminden daha fazla olabilmektedir. İndirgeme faktörü sayısını arttırarak birbirinden tamamen farklı sınırlar oluşturmak her saha için mümkün değildir. Literatürde bu sorun açıklık problemi olarak adlandırılmaktadır. Art arda iki iç içe ocak sınırları arasında hedeflenen miktardan fazla cevher bloğunun olması; jeolojik parametrelere, operasyonel maliyetlere ve cevher tenörüne bağlıdır.

### ***3.5.2 Periyot Sınırlarının Belirlenmesi***

Periyot sınırlarının belirlenmesinin ilk aşaması iç içe ocakların oluşturulmasıdır. Oluşturulan iç içe ocak sınırları küçükten büyüğe sıralanmaktadır. GHKA ile bir ocak sınıra dahil edilen bloklar, dahil edilme sırasına göre kayıt altına alınmaktadır. İç içe ocaklardan birinci sıradaki sınıra dahil edilen ilk koni, birinci periyot sınırının ilk konisidir. En küçük yani ilk ocağın konileri sırasıyla ilk periyodun sınırına dahil edilir. Periyot üretim miktarı hedefi sağlandığında, ocak sınırındaki kalan koniler sırasıyla sıradaki periyodun sınırına dahil edilmeye başlanır.

Bir periyot sınırı oluşturulurken hedeflenen üretim miktarı henüz sağlanmadıysa ve işlemdeki iç içe ocaktaki koni sıralamasının sonuna gelindiye işlemdeki periyot sınırını oluşturmaya bir sonraki iç içe ocaktaki koniler dahil edilerek devam edilir.

Sıradaki koninin içinde başka cevher konileri yer alabilmektedir. Bu durumda öncelikli olarak topoğrafyaya en yakın cevher bloğunun konisiyle işleme başlanmalıdır. Tepe noktası en üstte yer alan koniden, kaynak cevher bloğuna kadar olan koniler sırasıyla işleme tabii tutulmalıdır.

Eğer işlemdeki periyot sınırında hedeflenen cevher miktarına ulaşılır, fakat dekapaj miktarına ulaşamazsa, bu durumda işlemdeki iç içe ocağın sıradaki konisinin sadece dekapaj blokları ilgili periyot sınırına dahil edilir. Bu aşamadaki önemli nokta; koninin dekapaj blokları periyot sınırına dahil edilirken, topoğrafya en yakın bloklardan işleme başlamaktır. Aynı şekilde kaynak koninin içerisinde başka bir cevher konisi varsa; ilk önce bu cevher konisinin dekapaj blokları periyot sınırına dahil edilmelidir.



Hesaplama işlemi, adım adım şeklinde aktarılacak olursa;

1. adım: Her bir periyot geçişinin vade süresi cinsinden ne kadar süreceği hesaplanmalıdır.

İki ocak ya da periyot sınırı arasındaki madencilik operasyonlarının ne kadar süreceği bulunmalıdır. Genellikle uzun vadeli üretim planlarında yıllık faiz oranı ve yıllık üretim miktarına göre hesaplama yapılmaktadır. Fakat çalışma kapsamında geliştirilen yazılımda vade süresi bir yıl olmak zorunda değildir. Örnek olarak her 7 ayda bir faiz oranı uygulanacaksa, sahadaki toplam rezerv miktarı göz önünde bulundurularak, her 7 ayda ne kadar cevher üretimi yapılabileceği tanımlanmalıdır. Bu durumda NBD hesabında vade süresi 7 aydır. Paranın zaman değeri 7 aya göre indirgenerek hesaplanacaktır.

İç içe ocaklara ait sonuçlar için peş peşe iki ocak arasındaki üretim miktarı farkı iki ocak arasındaki geçişi ifade etmektedir. Üretim miktarı farkı, vadede çıkarılması hedeflenen cevher üretim miktarına oranlanarak iki ocak arasındaki geçiş süresi hesaplanmalıdır.

İç içe ocakların sınırları kullanılarak eşit örtü-kazı oranına sahip üretim planında ise peş peşe iki periyot arasındaki üretim miktarı farkı, iki periyot arasındaki madencilik operasyonlarının ne kadar süreceğini ifade etmektedir. Bu durumda aynı şekilde iki periyot arasındaki üretim miktarı farkı, vadede çıkarılması hedeflenen cevher üretim miktarına oranlanarak geçiş süresi hesaplanmalıdır.

2. adım: Periyot geçişlerindeki ortalama kâr değeri hesaplanmalıdır.

Peş peşe iki periyot arasındaki kâr değeri, iki periyot arasındaki geçiş süresine oranlanarak bir vadedeki ortalama kâr değeri hesaplanmaktadır (dolar/vade süresi).

3. adım: Periyot geçişlerindeki geçiş süresinin ondalık kısmı için indirgenecek kâr değeri hesaplanmalıdır.

Örnek olarak vade süresinin 15 ay olduğu senaryoda bir geçiş süresi 42 ay olarak hesaplanmış olabilir. Bu durumda geçiş süresi 42/15 yani 2,8 vade süresidir. Senaryo için geçişteki yani iki periyot arasındaki kâr farkı 840 000 dolar olsun. Böylece bir vade süresi için ortalama kâr değeri 300 000 dolar/vade süresidir. 2,8 vade süresi, 2 tam vade süresinden ve 0,8 ondalık vade süresinden meydana gelmektedir. Ondalık vade süresi için yani 0,8 vade süresi için kâr değeri 240 000 dolar olarak bulunur.

4. adım: Son adımda her vade süresi için hesaplanan kâr değerlerine faiz oranına bağlı olarak indirgeme faktörü uygulanmalıdır. Tüm ocak geçişleri için indirgenmiş kâr değerlerinin toplamı, işletmenin toplam elde edeceği NBD'dir.

Toplam cevher rezervi 13 milyon ton olan bir işletmede, yıllık %8 faiz oranıyla, yıllık 1,1 milyon ton üretim hedeflendiğini varsayalım. Dört periyotluk bir üretim planında üretim gerçekleştirildiğinde periyot geçişlerinde elde edilen üretim miktarları, periyot geçiş süreleri ve kâr değerleri Tablo 3.20'deki gibi olsun. Örnek işletmenin NBD'si aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Tablo 3.20'de  $PG_{a,b}$ ,  $a$  ve  $b$  ardışık periyotlar olmak üzere,  $a$  numaralı periyottan  $b$  numaralı periyota geçişi ifade etmektedir. Bir başka deyişle,  $a$  numaralı periyot sınırı ile  $b$  numaralı periyot sınırı arasında kalan bölgenin üretilmesi sonucu elde edilen verilerdir.

Tablo 3.20 Örnek işletmenin periyot geçişlerine ait cevher üretim miktarları, geçiş süreleri ve kâr değerleri

Periyot Geçişleri	$PG_{0,1}$	$PG_{1,2}$	$PG_{2,3}$	$PG_{3,4}$	Toplam
Geçiş üretim miktarı (milyon ton)	2,55	3,05	3,55	3,85	13,00
Geçiş kârı (milyon dolar)	5,00	6,20	6,50	6,80	24,50
Periyot geçiş süresi (yıl)	2,32	2,77	3,23	3,50	11,82
Sürenin tam kısmı (yıl)	2	2	3	3	
Kümülatif süre (yıl)	2,32	5,09	8,32	11,82	

Tablo 3.20 Devamı

Ortalama yıllık kâr (milyon dolar)	2,16	2,24	2,01	1,94
Kârın ondalık kısmı (milyon dolar)	0,69	1,73	0,46	0,97

Tablo 3.20’de yer alan geçiş üretim miktarı ve geçiş kâr değerleri, periyot sınırları oluşturulduktan sonra periyotlar arasında kalan bölgedeki bloklardan elde edilen verilerdir. Örnek olarak 1. periyottan 2. periyoda geçiş verilerinin hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$PG_{1,2}(\text{geçiş süresi}) = \frac{3,05}{1,1} = 2,77 \text{ yıl}$$

$$PG_{1,2}(\text{sürenin tam kısmı}) = 2 \text{ yıl}$$

$$PG_{1,2}(\text{kümülatif süre}) = PG_{0,1} + PG_{1,2} = 2,32 + 2,77 = 5,09 \text{ yıl}$$

$$PG_{1,2}(\text{ortalama yıllık kâr}) = \frac{6,20}{2,77} = 2,24 \text{ milyon Dolar}$$

$$PG_{1,2}(\text{kârın ondalık kısmı}) = 6,20 - 2 \times 2,24 = 1,73 \text{ milyon Dolar}$$

Örnek işletmenin vade süresi 1 yıl olduğu için yıllara göre ve toplam NBD verileri Tablo 3.21’de verilmektedir.

Tablo 3.21 Örnek işletmenin yıllara ve sürenin ondalıklı kısımlarına göre NBD verileri

Yıllar	Periyot Geçişleri	PG <sub>0,1</sub> (milyon Amerikan doları)	PG <sub>1,2</sub> (milyon Amerikan doları)	PG <sub>2,3</sub> (milyon Amerikan doları)	PG <sub>3,4</sub> (milyon Amerikan doları)
Önceki kümülatif süre + 1 yıl		2,00	1,73	1,26	0,95
Önceki kümülatif süre + 2 yıl		1,85	1,60	1,17	0,88
Önceki kümülatif süre + 3 yıl		–	–	1,08	0,81
Periyot kümülatif süresi		0,57	1,17	0,24	0,39
Periyot toplam NBD		4,42	4,50	3,75	3,03

Tablo 3.21’de verilen yıllara göre ve sürenin ondalıklı kısımlarına göre NBD verilerinden örnek olarak 2. periyottan 3. periyoda geçişteki hesaplamalar aşağıda verilmektedir.

2. periyot kümülatif süresi + 1 yıl için:

$$NBD = \frac{2,01}{(1 + 0.08)^{(1+5,09)}} = 1,26 \text{ milyon Dolar}$$

2. periyot kümülatif süresi + 2 yıl için:

$$NBD = \frac{2,01}{(1 + 0.08)^{(2+5,09)}} = 1,17 \text{ milyon Dolar}$$

2. periyot kümülatif süresi + 3 yıl için:

$$NBD = \frac{2,01}{(1 + 0.08)^{(3+5,09)}} = 1,08 \text{ milyon Dolar}$$

3. periyot kümülatif süresi için:

$$NBD = \frac{0,46}{(1 + 0.08)^{(8,32)}} = 0,24 \text{ milyon Dolar}$$

3. periyodun toplam NBD’si:

$$NBD_{\text{toplam}} = 1,26 + 1,17 + 1,08 + 0,24$$

$$= 3,75 \text{ milyon Dolar}$$

## **BÖLÜM 4**

### **ÇALIŞMA KAPSAMINDA GELİŞTİRİLEN YAZILIM VE ÖRNEK ÇALIŞMALAR**

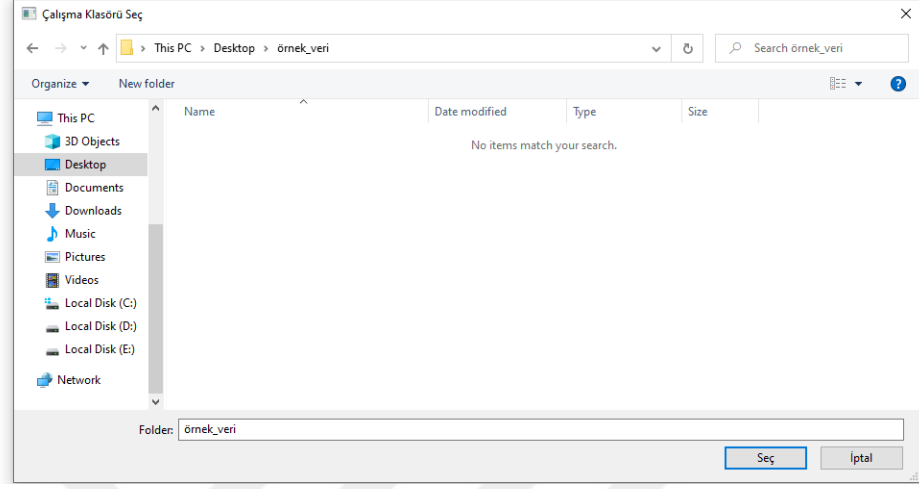
#### **4.1 Giriş**

Bu çalışmadaki yöntemlere ait algoritmalar C++ programlama dili kullanılarak bilgisayar yazılımı haline getirilmiştir. Bu bölümde yer alan yazılım arayüzü ve sonuç görselleri Qt çatısı (framework) ortamında geliştirilmiştir. Yazılım, çalışmanın geldiği aşamada şu an için sadece Microsoft Windows işletim sistemlerinde çalışmaktadır.

Altın ve tungsten cevherine ait iki ayrı gerçek maden sahası verileri yazılıma aktarılmış ve uygulaması yapılmıştır.

#### **4.2 Yazılım Arayüzünün Tanıtılması**

Yazılım üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlardan ilki verilerin hazırlanması bölümüdür. Yeni bir proje üzerinde çalışmanın ilk adımı çalışma klasörü tanımlamaktır. Dosya menüsünde yer alan “Çalışma Klasörü” aracılığıyla program girdi dosyalarının yer aldığı klasör seçilmektedir. Çalışma klasörü seçim ekranı Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1 Çalışma klasörü seçim ekranı

Çalışma klasörü tanımlandıktan sonra EBM dosyaları oluşturulmalıdır. Girdi dosyası olarak kullanıcıdan topoğrafya koordinatlarını içeren dosya ve cevher tenör değerlerini içeren dosya gerekmektedir. Örnek topoğrafya veri dosyası Şekil 4.2’de, örnek cevher tenör değerleri dosyası ise Şekil 4.3’te verilmektedir. Girdi dosyaları tanımlandıktan sonra inceleme yapılacak sahanın jeolojik ve işletme parametreleri girilerek EBM dosyaları oluşturulmaktadır. EBM oluşturma ekranı Şekil 4.4’te verilmektedir.

	A	B	C	D
1	x	y	z	
2	688104.2	4441487	1870	
3	688097.5	4441490	1870	
4	688094.5	4441492	1870	
5	688091.7	4441493	1870	
6	688089.2	4441495	1870	
7	688090.2	4441497	1870	
8	688084.8	4441499	1870	
9	688083	4441501	1870	
10	688081.5	4441503	1870	
11	688080.2	4441506	1870	
12	688079.1	4441508	1870	
13	688078.2	4441511	1870	
14	688077.1	4441517	1870	
15	688076.5	4441524	1870	
16	688076.3	4441529	1870	
17	688076.3	4441536	1870	
18	688076.4	4441537	1870	
19	688076.7	4441538	1870	
20	688125.4	4441480	1870	
21	688114.6	4441484	1870	
22	688104.2	4441487	1870	
23	688041	4441560	1870	
24	688037.5	4441561	1870	
25	688034.5	4441563	1870	
26	688031.9	4441565	1870	

Şekil 4.2 Örnek topoğrafya koordinatları dosyası

		Clipboard		Font	
		L13			
		✕ ✓ <i>fx</i>			
	A	B	C	D	
1	x	y	z	grade_percentage	
2	685950	4439952	2207	0.65	
3	685950	4439952	2197	0.455	
4	685950	4439952	2187	0.501	
5	685950	4439952	2177	0.194	
6	685950	4439952	2167	0.174	
7	685950	4439952	2157	0.164	
8	685950	4439952	2147	0.234	
9	685950	4439952	2137	0.252	
10	685950	4439952	2127	0.28	
11	685950	4439952	2117	0.263	
12	685950	4439952	2107	0.26	
13	685950	4439952	2097	0.26	
14	685950	4439952	2087	0.26	
15	685950	4439952	2077	0.205	
16	685950	4439972	2277	0.448	
17	685950	4439972	2267	0.352	
18	685950	4439972	2257	0.325	
19	685950	4439972	2247	0.242	
20	685950	4439972	2237	0.232	
21	685950	4439972	2227	0.253	

Şekil 4.3 Örnek tenör verileri dosyası

Ekonomik Blok Model Oluşturma

Arazi Ayarları Cevher Blok Modeli İşletme Parametreleri Diğer Ayarlar

Topoğrafya Dosyası

Seç volfram\_topo\_ham.csv

Dosya uzantısı csv olmalı.

Arazi Parametreleri

Genel Şev Açısı (Derece)	45.0
Cevher Yoğunluğu (t/m3)	2.5
Kayaç Yoğunluğu (t/m3)	2.5
Blok Uzunluğu (X)	20.0
Blok Eni (Y)	20.0
Blok Yüksekliği (Z)	10.0

Uygula

Şekil 4.4 EBM oluşturma ekranı

Yazılımın ikinci ana bölümünde iç içe ocaklar ve periyot sınırları oluşturulmaktadır. İç içe ocakların oluşturulmasında kullanılacak olan indirgeme faktörleri girişi ve bu faktörlerin hangi yöntemle değerlendirilmesi gerektiği kullanıcıdan istenmektedir. İkinci sekmede ise periyot sınırlarını oluşturmak üzere vade süresinde hedeflenen cevher üretim miktarı ve vade süresi için faiz oranı istenmektedir. Ayrıca sabit örtü-kazı oranıyla istenilen üretim periyodu sayısı ya da bir periyot için istenilen üretim miktarı girdi olarak kullanıcıdan istenmektedir. Daha çok derinde bulunan madenlerde kullanılması amacıyla, kullanıcıya seyreltme kazısı yapma imkânı tanınmaktadır. Bunun için kullanıcıdan yapılacak seyreltme kazısı miktarı metreküp cinsinden istenmektedir. Böylece girilen miktar için yatırım döneminde sadece istenilen miktarda dekapaj kazısı yapılarak cevherin üzeri açılmış olacaktır. Bu bölüme ait arayüzün ekran görüntüsü Şekil 4.5'te verilmektedir.

Örtü-Kazı Oranı Optimizasyonu

İç İçe Ocaklar Optimizasyon Ayarları Gereklİ Dosyalar

Mevcut iç içe ocak sonuçlarını kullan.

Uygula

Genel Şev Açısı 45.0

Seviye Sayısı 40

Yöntem

Cevher Bloğu Ekonomik Değeri = Faktör × (Gelir – Gider)

Cevher Bloğu Ekonomik Değeri = (Faktör × Gelir) – Gider

Faktörler (0.001 - 1.000 arasında olmalı)

0.01	1.00	0.01	Ekle
0.01	1.00	0.01	

Sil Listeyi Temizle

Şekil 4.5 Örtü-kazı oranı optimizasyonu kullanıcı arayüzü

Yazılımın üçüncü ana bölümü sonuçların görüntülenmesidir. Bunun için ana menüde “Sayılar” ve “Kesitler” menüleri yer almaktadır. Sayılar bölümünde oluşturulmuş olan iç içe ocaklar ve periyot sınırlarına ait cevher ve dekapaj miktarları, örtü-kazı oranları, ortalama tenör değerleri, ocak geçişleri için gerekli süre, ocak geçiş kâr değerleri ve ocak geçişlerinde elde edilen NBD verileri listelenmektedir. Örnek sayılar listesine ait ekran görüntüsü Şekil 4.6’da verilmektedir.

Ocak Geçişleri	Cevher (ton)	Dekapaj (m <sup>3</sup> )	Örtü-Kazı Oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Ortalama Tenör (ppm)	Gerekli Süre (Vade Süresi)	Kâr (Dolar)	Net Bugünkü Değer (Dolar)
Periyot-1	543437.50	1057375.00	1.95	2.46	1.01	649824768.00	590747520.00
Periyot-2 - Periyot-1	543437.50	1057375.00	1.95	2.17	1.01	559787776.00	462352128.00
Periyot-3 - Periyot-2	543437.50	1057250.00	1.95	1.11	1.01	246719488.00	185138432.00
Periyot-4 - Periyot-3	543437.50	1057250.00	1.95	1.09	1.01	240564992.00	164009728.00
Periyot-5 - Periyot-4	543437.50	1057250.00	1.95	1.15	1.01	258072960.00	159853952.00
Periyot-6 - Periyot-5	543437.50	1057250.00	1.95	1.70	1.01	418578560.00	235560064.00
Periyot-7 - Periyot-6	543125.00	1057250.00	1.95	1.31	1.01	302816768.00	154827648.00
Periyot-8 - Periyot-7	543125.00	1057250.00	1.95	1.23	1.01	279002624.00	129611904.00
Periyot-9 - Periyot-8	543125.00	1057250.00	1.95	1.15	1.01	253591040.00	107038080.00
Periyot-10 - Periyot-9	543125.00	1057250.00	1.95	1.58	1.01	379147520.00	145405440.00
Toplam	5433125.00	10572750.00	1.95	1.50	10.06	3588106496.00	2334544896.00

Şekil 4.6 Sayılar bölümüne ait örnek ekran görüntüsü

Üçüncü ana bölümün ikinci kısmı olan kesitler bölümünde elde edilen sonuçlar için kesit görünüşler oluşturulabilmektedir. Her bir iç içe ocağa ya da üretim periyoduna renk atayarak hangi blokların hangi ocağa ya da üretim periyoduna ait olduğunu görüntülemek mümkündür. Ayrıca ana menüde veri sekmesinde yer alan tenör dağılım özelliği kullanarak bloklara tenör değerlerine göre renk atama olanağı vardır. Tenör dağılım ekranında sahadaki tenör dağılımın kaç gruptan oluşması gerektiği girilerek hesaplama yaptırılır. Her bir gruba ait ortalama tenör, standart sapma ve tüm sahanın ortalama tenör ve standart sapma değerlerine ulaşmak mümkündür. Örnek veriye ait 10 grupta sınıflandırılmış tenör dağılımı ekran görüntüsü Şekil 4.7’de sunulmuştur.

Tenör Dağılımı

Parametreler

Tenör Dağılımı Grup Sayısı

Yeniden Hesapla

Kaydet

Grup No	Aralık (%)	Blok Sayısı	Ortalama (%)	Standart Sapma (%)	Yüzdesel Dağılım (%)
Grup-01	0.08 - 0.25	3699	0.17	0.05	32.07
Grup-02	0.25 - 0.42	4672	0.32	0.05	40.51
Grup-03	0.42 - 0.59	2021	0.49	0.05	17.52
Grup-04	0.59 - 0.76	748	0.66	0.05	6.49
Grup-05	0.76 - 0.93	297	0.82	0.05	2.57
Grup-06	0.93 - 1.10	70	0.98	0.04	0.61
Grup-07	1.10 - 1.27	13	1.17	0.05	0.11
Grup-08	1.27 - 1.44	10	1.32	0.04	0.09
Grup-09	1.44 - 1.61	2	1.58	0.00	0.02
Grup-010	1.61 - 1.85	2	1.74	0.12	0.02
Toplam	0.08 - 1.85	11534	0.34	0.18	100.00

Şekil 4.7 Örnek veriye ait 10 gruptan oluşan tenör dağılımı ekran görüntüsü

Şekil 4.7 incelendiğinde, toplam 11 534 cevher bloğunun tenörlerinin %0,08 ve %1,85 aralığında dağılım gösterdiği görülmektedir. Örnek verinin ortalama tenör değeri %0,34 ve bu verilerin standart sapmasının ise  $\pm$ %0,18 olduğu görülmektedir. Ayrıca cevher bloklarının %72,58'inin tenör değeri %0,42'nin altındadır. Bu veriler yorumlandığında, sahadaki cevherleşmenin kalite değeri olarak homojen bir yapı

sergilemediği anlaşılmaktadır. Bu bölümde kullanılan ortalama tenör ve standart sapma hesap formülasyonları sırasıyla Eşitlik 4.1 ve 4.2’de sunulmuştur.

$T_{ort}$  = Grubun ortalama tenörü (%)

$S$  = Gruptaki tenör değerlerinin standart sapması (%)

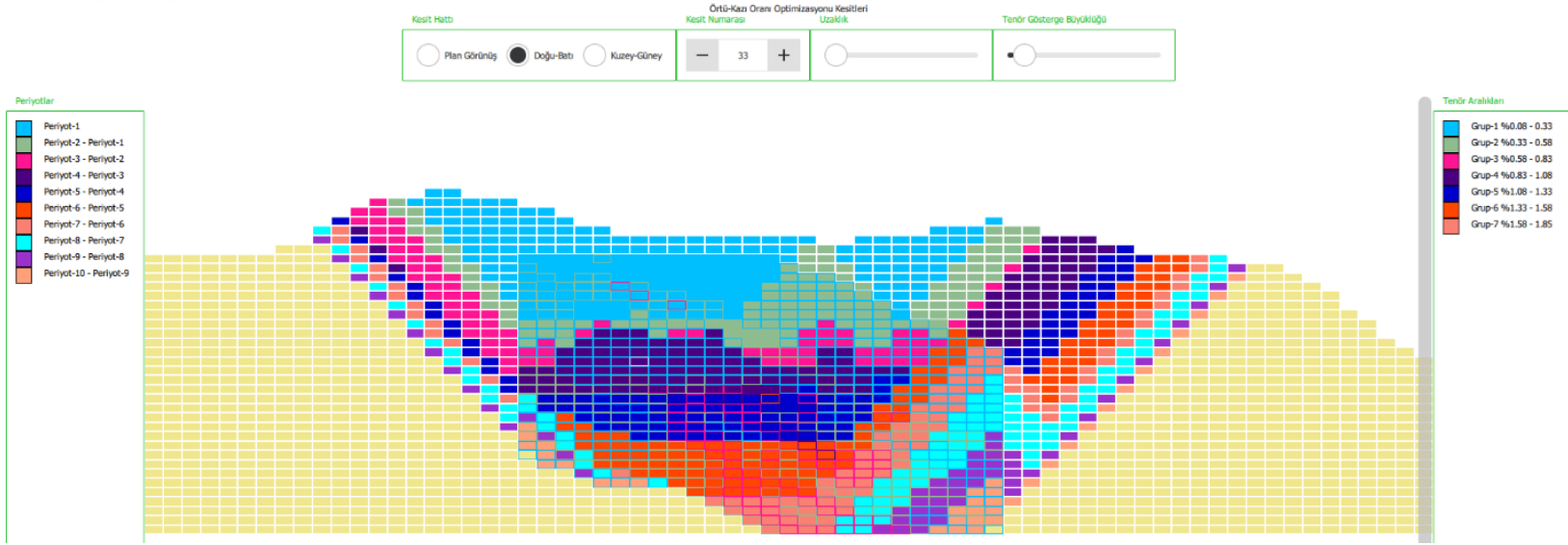
$T_i$  = Gruptaki cevher bloğunun tenörü (%) ( $T_i$ )

$n$  = Gruptaki toplam cevher bloğu sayısı ( $n$ )

$$T_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (4.1)$$

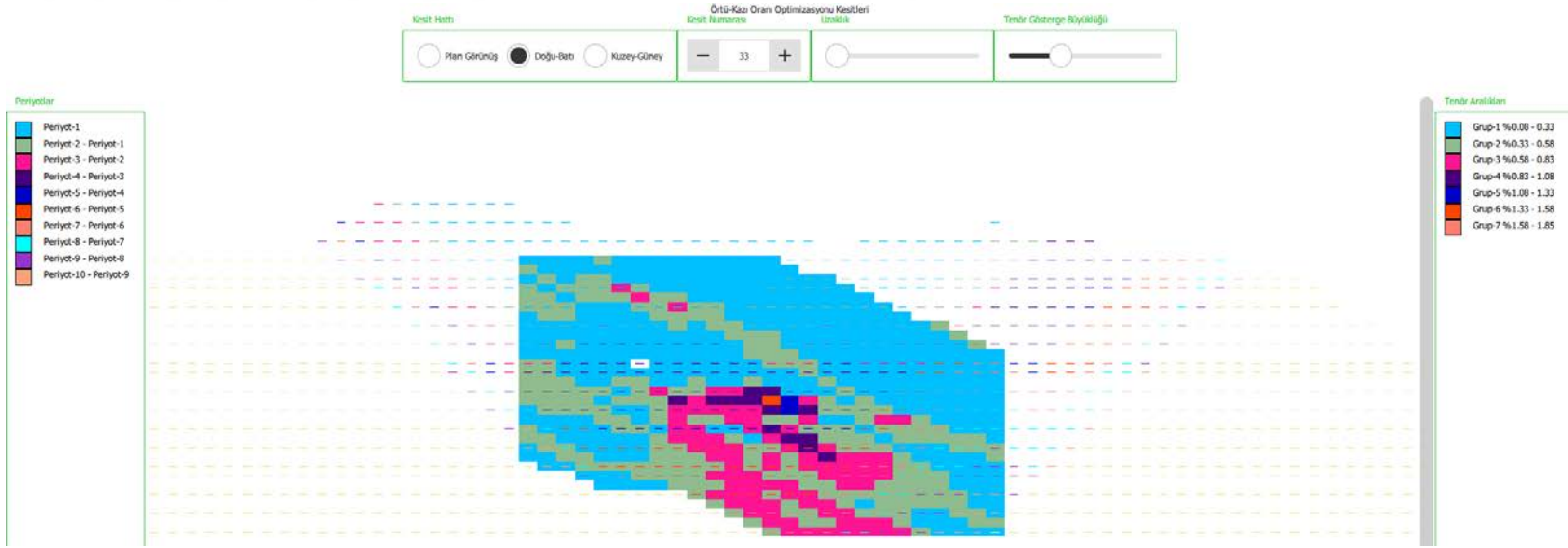
$$S = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n T_i^2) - (n \times T_{ort}^2)}{n}} \quad (4.2)$$

Kesitler bölümünde plan görünüş, Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerinde kesitler alınabilmektedir. Kesitler bölümüne ait örnek ekran görüntüsü Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8 Kesitler bölümü örnek ekran görüntüsü

Kesitler bölümünde periyot sınırlarına ve tenör aralıklarına ait olmak üzere iki adet lejant bulunmaktadır. Periyot sınırlarında  $A$  ve  $B$  art arda iki periyot sınırı olsun. Periyot  $B -$  Periyot  $A$  isimlendirmesi  $B$  sınırı ile  $A$  sınırı arasındaki bölgede kalan blokları simgelemektedir. Blok renkleri, lejant üzerindeki blok düğmesine tıklayarak istenilen renge ayarlanabilmektedir. Kesit numarası kontrolünden istenilen kesite geçilebilmektedir. Uzaklık kontrolüyle blok modele yaklaşım uzaklaşlabilmektedir. Blokların rengi periyot rengidir. Blokların kenarlık rengi ise tenör grubunu göstermektedir. “Tenör Gösterge Büyüklüğü” kontrolüyle kenarlık kalınlığı değiştirilebilmektedir. Bu kontroldeki ayar en yükseğe getirildiğinde ise sahadaki sadece cevherleşmeyi ve tenör dağılımını daha net görüntülemek mümkündür. Sadece cevherleşmenin ve tenör dağılımın görüntülenmesi sonucu elde edilen örnek görünüş Şekil 4.9’da sunulmaktadır.



Şekil 4.9 Cevherleşme ve tenör dağılımına ait örnek görünüş

### 4.3 Altın Madeni Verileriyle Yapılan Örnek Çalışma

Örnek altın madeninde mineralleşme damar tipidir ve yataklanma ise epitermaldir. Damar eğimi yaklaşık 33 derecedir. EBM’de bloklar kübiktir ve her bir kenar uzunluğu 5 metredir. Sahada doğu-batı yönünde 130, kuzey-güney yönünde 145 ve düşey yönde 40 olmak üzere toplam 754 bin blok bulunmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan genel şev açısı her yön için 45 derecedir. EBM’de sadece sınır tenör üzerindeki bloklar hesaba katıldığında toplam 5,5 milyon ton rezerv bulunmaktadır.

Altın madeni çalışması için ilk olarak iç içe ocaklar oluşturulmuştur. Değerleri 0,01 ile 1,00 arasında bulunan eşit aralıklı toplam 100 adet indirgeme faktörü kullanılmıştır. Böylece toplam 100 adet iç içe ocak elde edilmesi amaçlanmıştır. Tablo 4.1’de iç içe ocaklara ait sonuçlar yer almaktadır.

Tablo 4.1 Altın madeni verisi için oluşturulan iç içe ocaklara ait sonuçlar

İndirgeme Faktörleri	Cevher Miktarı (ton)	Dekapaj Miktarı (m <sup>3</sup> )	Örtü-Kazı Oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Ortalama Tenör (ppm)	Net Kâr (milyon Amerikan doları)
0,010 - 0,000	254 062,50	83 625,00	0,33	2,91	380,33
0,020 - 0,010	206 562,50	80 000,00	0,39	1,97	203,54
0,030 - 0,020	294 062,50	227875,00	0,77	2,24	329,26
0,040 - 0,030	319 375,00	343 500,00	1,08	2,15	338,68
0,050 - 0,040	81 562,50	65 250,00	0,80	1,36	51,80
0,060 - 0,050	80 937,50	73 750,00	0,91	1,20	44,34
0,070 - 0,060	12 187,50	13 250,00	1,09	1,20	6,60
0,080 - 0,070	1 900 000,00	2 187 875,00	1,15	1,26	1 076,47
0,090 - 0,080	117 812,50	172 625,00	1,47	1,31	68,65
0,100 - 0,090	192 187,50	330 375,00	1,72	1,32	111,65
0,110 - 0,100	6 562,50	13 875,00	2,11	1,54	4 447,49
0,120 - 0,110	390 625,00	670 750,00	1,72	1,29	216,34
0,130 - 0,120	165 625,00	316 625,00	1,91	1,22	85,27
0,140 - 0,130	19 062,50	46 375,00	2,43	1,30	10,37
0,150 - 0,140	208 750,00	457 250,00	2,19	1,23	105,31
0,160 - 0,150	6 562,50	14 500,00	2,21	1,12	2,94
0,170 - 0,160	6 562,50	13 125,00	2,00	1,05	2,70
0,180 - 0,170	2 500,00	7 000,00	2,80	1,14	1,11

Tablo 4.1 Devami

0,190 - 0,180	655 625,00	1 718 750,00	2,62	1,19	304,69
0,200 - 0,190	7 500,00	30 500,00	4,07	1,42	4,07
0,210 - 0,200	29 062,50	115 500,00	3,97	1,43	16,06
0,220 - 0,210	83 437,50	325 500,00	3,90	1,47	46,77
0,230 - 0,220	10 312,50	52 000,00	5,04	1,58	6,11
0,240 - 0,230	9 687,50	35 750,00	3,69	1,13	3,85
0,250 - 0,240	2 187,50	13 125,00	6,00	1,98	1,64
0,260 - 0,250	4 375,00	10 250,00	2,34	0,68	898,82
0,270 - 0,260	84 375,00	391 250,00	4,64	1,51	46,22
0,280 - 0,270	937,50	1 375,00	1,47	0,51	135,94
0,290 - 0,280	12 812,50	44 125,00	3,44	1,02	4,31
0,300 - 0,290	7 500,00	12 250,00	1,63	0,56	1,22
0,310 - 0,300	625,00	3 500,00	5,60	1,42	0,29
0,320 - 0,310	64 375,00	357 125,00	5,55	1,54	33,59
0,330 - 0,320	1 250,00	9 250,00	7,40	1,67	0,69
0,340 - 0,330	4 687,50	34 500,00	7,36	1,70	2,58
0,350 - 0,340	312,50	500,00	1,60	0,41	0,03
0,360 - 0,350	4 687,50	17 000,00	3,63	0,85	1,18
0,370 - 0,360	625,00	375,00	0,60	0,25	0,03
0,380 - 0,370	625,00	3 750,00	6,00	1,23	0,23
0,390 - 0,380	9 687,50	63 000,00	6,50	1,30	3,74
0,400 - 0,390	625,00	1 250,00	2,00	0,52	0,08
0,410 - 0,400	1 875,00	18 125,00	9,67	1,67	0,87
0,420 - 0,410	1 875,00	14 375,00	7,67	1,44	0,73
0,430 - 0,420	15 625,00	136 875,00	8,76	1,64	7,09
0,440 - 0,430	1 250,00	7 875,00	6,30	1,24	0,42
0,450 - 0,440	312,50	2 375,00	7,60	1,52	0,13
0,460 - 0,450	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,470 - 0,460	1 250,00	13 375,00	10,70	1,65	0,53
0,480 - 0,470	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,490 - 0,480	4 687,50	17 750,00	3,79	0,69	0,69
0,500 - 0,490	84 062,50	986 375,00	11,73	1,96	41,64
0,510 - 0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,520 - 0,510	625,00	20 250,00	32,40	4,68	0,74
0,530 - 0,520	1 250,00	7 875,00	6,30	1,02	0,28
0,540 - 0,530	937,50	11 000,00	11,73	1,97	0,43
0,550 - 0,540	937,50	23 875,00	25,47	3,60	0,80
0,560 - 0,550	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablo 4.1 Devami

0,570 - 0,560	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,580 - 0,570	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,590 - 0,580	625,00	4 875,00	7,80	0,97	0,12
0,600 - 0,590	5 000,00	4 125,00	0,82	0,23	0,11
0,610 - 0,600	1 562,50	6 875,00	4,40	0,67	0,17
0,620 - 0,610	1 250,00	3 875,00	3,10	0,52	0,10
0,630 - 0,620	312,50	2 125,00	6,80	1,11	0,06
0,640 - 0,630	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,650 - 0,640	937,50	19 750,00	21,07	2,23	0,38
0,660 - 0,650	21 875,00	445 000,00	20,34	2,51	9,69
0,670 - 0,660	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,680 - 0,670	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,690 - 0,680	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,700 - 0,690	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,710 - 0,700	2 812,50	52 875,00	18,80	2,18	0,93
0,720 - 0,710	2 187,50	28 625,00	13,09	1,60	0,46
0,730 - 0,720	6 562,50	129 000,00	19,66	2,24	2,04
0,740 - 0,730	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,750 - 0,740	312,50	125,00	0,40	0,17	0,01
0,760 - 0,750	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,770 - 0,760	312,50	125,00	0,40	0,17	0,01
0,780 - 0,770	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,790 - 0,780	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,800 - 0,790	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,810 - 0,800	625,00	250,00	0,40	0,17	0,01
0,820 - 0,810	4 062,50	82 500,00	20,31	2,10	0,78
0,830 - 0,820	625,00	5 750,00	9,20	1,09	0,06
0,840 - 0,830	625,00	5 875,00	9,40	1,09	0,05
0,850 - 0,840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,860 - 0,850	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,870 - 0,860	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,880 - 0,870	625,00	8 750,00	14,00	1,35	0,05
0,890 - 0,880	937,50	19 750,00	21,07	1,97	0,07
0,900 - 0,890	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,910 - 0,900	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,920 - 0,910	3 437,50	108 875,00	31,67	2,73	0,41
0,930 - 0,920	1 250,00	13 125,00	10,50	0,90	0,01
0,940 - 0,930	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablo 4.1 Devamı

0,950 - 0,940	312,50	10 250,00	32,80	2,77	0,03
0,960 - 0,950	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,970 - 0,960	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,980 - 0,970	937,50	1 500,00	1,60	0,25	0,01
0,990 - 0,980	937,50	375,00	0,40	0,16	0,01
1,000 - 0,990	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Toplam</b>	<b>5 433 125,00</b>	<b>10 572 750,00</b>	<b>1,95</b>	<b>1,50</b>	<b>3 588,11</b>

Tablo 4.1 incelendiğinde, toplam 75 adet farklı büyüklükte iç içe ocağın başarılı şekilde oluşturulduğu görülmektedir. 25 adet indirgeme faktöründe, bir önceki faktör değerinden yeterince büyük olmadığı için daha büyük bir sınır tespit edilememiştir. Sahadaki toplam 5,5 milyon ton rezervin 5,4 milyon tonunun girilen parametrelere göre ekonomik olarak çıkarılabildiği görülmektedir. Nihai örtü-kazı oranı 1,95 m<sup>3</sup>/ton, ortalama tenör ise 1,50 ppm olarak hesaplanmıştır.

Çıkarılması mümkün olan 5,4 milyon ton cevher için, yıllık %10 faiz oranıyla, yıllık 550 bin ton cevher üretimi ile 10 yıl işletme ömrü hedeflendiğinde elde edilen periyot sınırlarına ait sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 Altın madeni verisi için oluşturulan periyot sınırlarına ait sonuçlar

Periyotlar (P)	Cevher Miktarı (ton)	Dekapaj Miktarı (m <sup>3</sup> )	Örtü-Kazı Oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Ortalama Tenör (ppm)	Vade Süresi (1 yıl)	Net Kâr (milyon Amerikan doları)	NBD (milyon Amerikan doları)
P1	543 437,50	1 057 375,00	1,95	2,46	1,01	649,82	590,75
P2-P1	543 437,50	1 057 375,00	1,95	2,17	1,01	559,79	462,35
P3-P2	543 437,50	1 057 250,00	1,95	1,11	1,01	246,72	185,14
P4-P3	543 437,50	1 057 250,00	1,95	1,09	1,01	240,56	164,01
P5-P4	543 437,50	1 057 250,00	1,95	1,15	1,01	258,07	159,85
P6-P5	543 437,50	1 057 250,00	1,95	1,70	1,01	418,58	235,56
P7-P6	543 125,00	1 057 250,00	1,95	1,31	1,01	302,82	154,83
P8-P7	543 125,00	1 057 250,00	1,95	1,23	1,01	279,00	129,61
P9-P8	543 125,00	1 057 250,00	1,95	1,15	1,01	253,59	107,04
P10-P9	543 125,00	1 057 250,00	1,95	1,58	1,01	379,15	145,41
<b>Toplam</b>	<b>5 433 125,00</b>	<b>10 572 750,00</b>	<b>1,95</b>	<b>1,50</b>	<b>10,06</b>	<b>3 588,11</b>	<b>2 334,54</b>

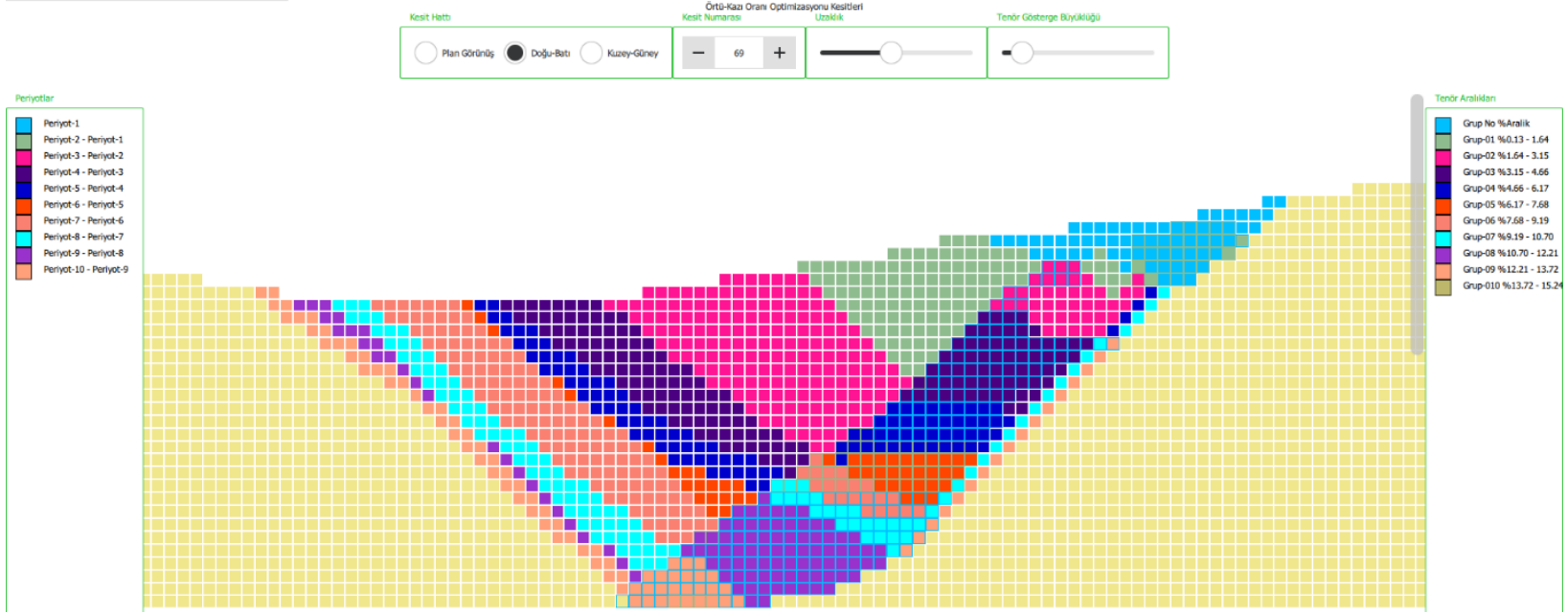
Tablo 4.2 incelendiğinde, nihai ocak sınırındaki 1,95 m<sup>3</sup>/ton örtü-kazı oranının 10 periyotta da elde edildiği görülmektedir. İşletmenin toplam NBD'si 2 334 milyon Amerikan dolarıdır. Sahadaki cevher bloklarının tenör dağılımına bakıldığında ise hesaplanan sonuçlar Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.3 Altın madeni verisine ait tenör dağılım sonuçları

Grup Numarası	Tenör Aralığı (ppm)	Cevher Bloğu Sayısı	Ortalama Tenör (ppm)	Standart Sapma (ppm)	Yüzdesel Dağılım (%)
Grup-01	0,13 - 1,64	11 224	0,80	0,46	64,25
Grup-02	1,64 - 3,15	4 925	2,09	0,39	28,19
Grup-03	3,15 - 4,66	642	3,60	0,31	3,67
Grup-04	4,66 - 6,17	390	5,63	0,46	2,23
Grup-05	6,17 - 7,68	122	6,35	0,15	0,70
Grup-06	7,68 - 9,19	107	8,56	0,34	0,61
Grup-07	9,19 - 10,70	54	9,56	0,16	0,31
Grup-08	10,70 - 12,21	5	11,22	0,00	0,03
Grup-09	12,21 - 13,72	0	0,00	0,00	0,00
Grup-10	13,72 - 15,24	1	15,24	0,00	0,01
Toplam	0,13 - 15,24	17 470	1,49	1,36	100,00

Tablo 4.3 incelendiğinde, değerlerin %92,44'ünün 0,13 ppm ile 3,15 ppm tenör aralığında olduğu görülmektedir. Verilerin standart sapmasının  $\pm 1,36$  ppm olması ve tenör değerlerinin 2 ppm civarında yoğunlaşması sebebiyle sahadaki kalite değerinin homojen bir yapıda olmadığını söylemek mümkündür.

Sonuçlar görselleştirildiğinde periyot sınırlarına ait Doğu-Batı yönü kesit görünüşü Şekil 4.10'da, Kuzey-Güney yönündeki kesit görünüşü ise Şekil 4.11'de verilmektedir. Cevherleşme ve tenör dağılımına ait Doğu-Batı yönü kesit görünüşü Şekil 4.12'de, Kuzey-Güney yönündeki kesit görünüşü ise Şekil 4.13'te verilmektedir.



Şekil 4.10 Altın madeni verisi Doğu-Batı yönünde periyot sınırları kesit görünüşü



Kesit Hattı

Örtü-Kazı Oranı Optimizasyonu Kesitleri

Kesit Numarası

Uzaklık

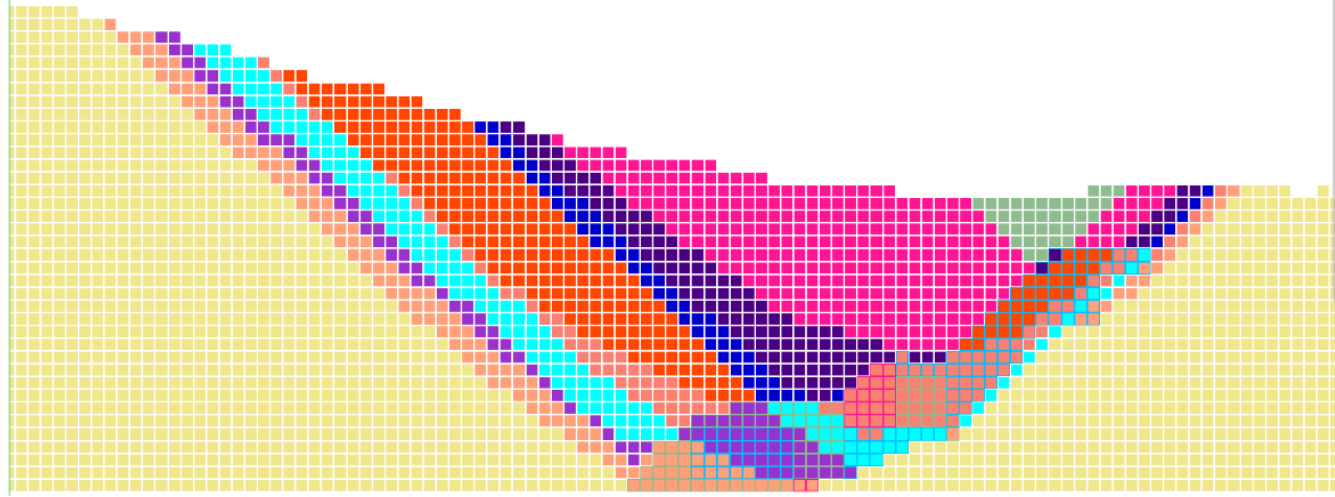
Tenör Gösterge Büyüklüğü

Plan Görünüş  Doğu-Batı  Kuzey-Güney

- 64 +

Periyotlar

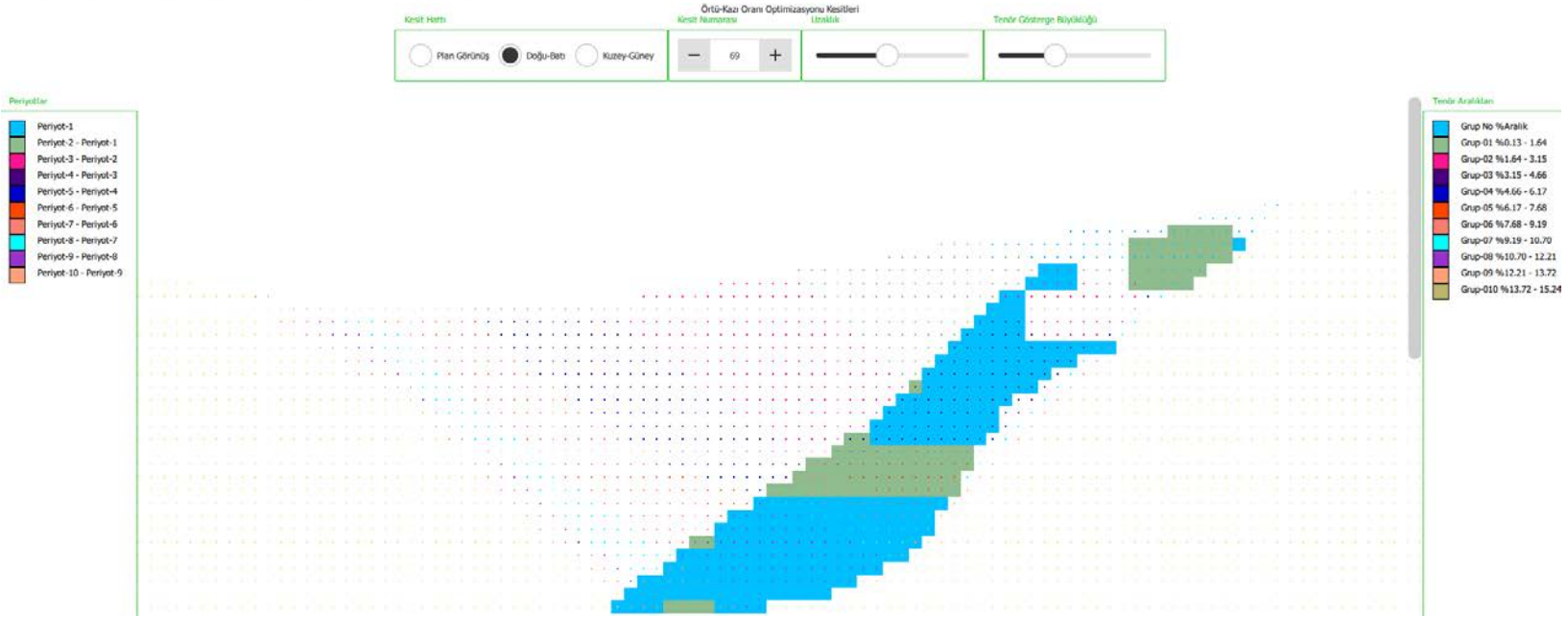
- Periyot-1
- Periyot-2 - Periyot-1
- Periyot-3 - Periyot-2
- Periyot-4 - Periyot-3
- Periyot-5 - Periyot-4
- Periyot-6 - Periyot-5
- Periyot-7 - Periyot-6
- Periyot-8 - Periyot-7
- Periyot-9 - Periyot-8
- Periyot-10 - Periyot-9



Tenör Aralıkları

- Grup No %Aralık
- Grup-01 %0.13 - 1.64
- Grup-02 %1.64 - 3.15
- Grup-03 %3.15 - 4.66
- Grup-04 %4.66 - 6.17
- Grup-05 %6.17 - 7.68
- Grup-06 %7.68 - 9.19
- Grup-07 %9.19 - 10.70
- Grup-08 %10.70 - 12.21
- Grup-09 %12.21 - 13.72
- Grup-010 %13.72 - 15.24

Şekil 4.11 Altın madeni verisi Kuzey-Güney yönünde periyot sınırları kesit görünüşü



Şekil 4.12 Altın madeni verisi Doğu-Batı yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü



Şekil 4.13 Altın madeni verisi Kuzey-Güney yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü

#### 4.4 Tungsten Madeni Verileriyle Yapılan Örnek Çalışma

Damar eğimi yaklaşık 10 derecedir. EBM’de bir bloğun uzunluğu 20 metre, genişliği 20 metre ve yüksekliği ise 10 metredir. Sahada doğu-batı yönünde 69, kuzey-güney yönünde 65 ve düşey yönde 47 olmak üzere toplam 210 795 blok bulunmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan genel şev açısı her yön için 45 derecedir. EBM’de sadece sınır tenör üzerindeki bloklar hesaba katıldığında toplam 115,3 milyon ton rezerv bulunmaktadır.

Tungsten madeni çalışması için ilk olarak iç içe ocaklar oluşturulmuştur. Değerleri 0,01 ile 1,00 arasında bulunan eşit aralıklı toplam 100 adet indirgeme faktörü kullanılmıştır. Böylece toplam 100 adet iç içe ocak elde edilmesi amaçlanmıştır. Tablo 4.4’te iç içe ocaklara ait sonuçlar yer almaktadır.

Tablo 4.4 Tungsten madeni verisi için oluşturulan iç içe ocaklara ait sonuçlar

İndirgeme Faktörleri	Cevher Miktarı (ton)	Dekapaj Miktarı (m <sup>3</sup> )	Örtü-Kazı Oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Ortalama Tenör (%)	Net Kâr (milyon Amerikan doları)
0,010 – 0,000	2 410 000	0	0,00	0,18	199,00
0,020 - 0,010	240 000	28 000	0,12	0,31	43,82
0,030 - 0,020	780 000	84 000	0,11	0,22	89,19
0,040 - 0,030	120 000	40 000	0,33	0,42	32,03
0,050 - 0,040	250 000	80 000	0,32	0,34	49,80
0,060 - 0,050	170 000	48 000	0,28	0,27	24,81
0,070 - 0,060	2 340 000	596 000	0,25	0,22	259,72
0,080 - 0,070	20 000	8 000	0,40	0,26	2,71
0,090 - 0,080	45 250 000	25 888 000	0,57	0,34	8 928,44
0,100 - 0,090	18 660 000	14 052 000	0,75	0,38	4 149,87
0,110 - 0,100	280 000	208 000	0,74	0,32	48,97
0,120 - 0,110	11 010 000	10 340 000	0,94	0,40	2 518,00
0,130 - 0,120	80 000	84 000	1,05	0,39	17,73
0,140 - 0,130	0	0	0,00	0,00	0,00
0,150 - 0,140	6 820 000	7 292 000	1,07	0,36	1 348,10
0,160 - 0,150	130 000	188 000	1,45	0,42	29,70
0,170 - 0,160	240 000	312 000	1,30	0,37	46,83
0,180 - 0,170	300 000	420 000	1,40	0,36	56,21

Tablo 4.4 Devami

0,190 - 0,180	5 360 000	7 012 000	1,31	0,35	961,08
0,200 - 0,190	70 000	68 000	0,97	0,25	7,46
0,210 - 0,200	460 000	920 000	2,00	0,43	104,03
0,220 - 0,210	110 000	192 000	1,75	0,38	20,99
0,230 - 0,220	3 830 000	6 300 000	1,64	0,35	659,98
0,240 - 0,230	750 000	988 000	1,32	0,29	98,89
0,250 - 0,240	80 000	188 000	2,35	0,44	17,71
0,260 - 0,250	60 000	116 000	1,93	0,35	9,87
0,270 - 0,260	600 000	1 144 000	1,91	0,35	95,85
0,280 - 0,270	0	0	0,00	0,00	0,00
0,290 - 0,280	20 000	40 000	2,00	0,34	3,08
0,300 - 0,290	2 850 000	5 956 000	2,09	0,35	442,07
0,310 - 0,300	80 000	132 000	1,65	0,29	9,35
0,320 - 0,310	40 000	104 000	2,60	0,39	6,91
0,330 - 0,320	0	0	0,00	0,00	0,00
0,340 - 0,330	20 000	72 000	3,60	0,49	4,42
0,350 - 0,340	30 000	80 000	2,67	0,26	1,84
0,360 - 0,350	2 240 000	4 892 000	2,18	0,31	271,45
0,370 - 0,360	20 000	44 000	2,20	0,31	2,36
0,380 - 0,370	10 000	16 000	1,60	0,24	0,80
0,390 - 0,380	50 000	156 000	3,12	0,39	7,72
0,400 - 0,390	20 000	32 000	1,60	0,23	1,51
0,410 - 0,400	30 000	112 000	3,73	0,43	5,00
0,420 - 0,410	10 000	20 000	2,00	0,24	0,68
0,430 - 0,420	1 400 000	4 344 000	3,10	0,35	178,66
0,440 - 0,430	170 000	476 000	2,80	0,32	18,81
0,450 - 0,440	0	0	0,00	0,00	0,00
0,460 - 0,450	0	0	0,00	0,00	0,00
0,470 - 0,460	40 000	108 000	2,70	0,29	3,55
0,480 - 0,470	200 000	592 000	2,96	0,32	20,53
0,490 - 0,480	40 000	116 000	2,90	0,31	3,75
0,500 - 0,490	40 000	68 000	1,70	0,20	2,01
0,510 - 0,500	0	0	0,00	0,00	0,00
0,520 - 0,510	30 000	32 000	1,07	0,16	0,93
0,530 - 0,520	50 000	100 000	2,00	0,22	2,79
0,540 - 0,530	1 450 000	4 228 000	2,92	0,29	113,31
0,550 - 0,540	0	0	0,00	0,00	0,00
0,560 - 0,550	0	0	0,00	0,00	0,00

Tablo 4.4 Devamı

0,570 - 0,560	100 000	516 000	5,16	0,43	12,44
0,580 - 0,570	20 000	116 000	5,80	0,46	2,63
0,590 - 0,580	30 000	92 000	3,07	0,23	0,87
0,600 - 0,590	400 000	1 368 000	3,42	0,29	26,47
0,610 - 0,600	0	0	0,00	0,00	0,00
0,620 - 0,610	90 000	332 000	3,69	0,28	4,13
0,630 - 0,620	190 000	888 000	4,67	0,36	15,62
0,640 - 0,630	0	0	0,00	0,00	0,00
0,650 - 0,640	20 000	64 000	3,20	0,22	0,24
0,660 - 0,650	40 000	180 000	4,50	0,33	2,69
0,670 - 0,660	0	0	0,00	0,00	0,00
0,680 - 0,670	0	0	0,00	0,00	0,00
0,690 - 0,680	880 000	3 300 000	3,75	0,29	47,31
0,700 - 0,690	10 000	4 000	0,40	0,10	0,06
0,710 - 0,700	10 000	4 000	0,40	0,10	0,05
0,720 - 0,710	0	0	0,00	0,00	0,00
0,730 - 0,720	20 000	44 000	2,20	0,19	0,51
0,740 - 0,730	20 000	60 000	3,00	0,22	0,55
0,750 - 0,740	190 000	556 000	2,93	0,23	5,33
0,760 - 0,750	60 000	380 000	6,33	0,39	3,43
0,770 - 0,760	0	0	0,00	0,00	0,00
0,780 - 0,770	0	0	0,00	0,00	0,00
0,790 - 0,780	0	0	0,00	0,00	0,00
0,800 - 0,790	0	0	0,00	0,00	0,00
0,810 - 0,800	0	0	0,00	0,00	0,00
0,820 - 0,810	0	0	0,00	0,00	0,00
0,830 - 0,820	0	0	0,00	0,00	0,00
0,840 - 0,830	110 000	512 000	4,65	0,28	1,97
0,850 - 0,840	10 000	40 000	4,00	0,26	0,23
0,860 - 0,850	40 000	188 000	4,70	0,28	0,60
0,870 - 0,860	250 000	1 300 000	5,20	0,31	6,30
0,880 - 0,870	30 000	288 000	9,60	0,49	1,22
0,890 - 0,880	20 000	112 000	5,60	0,32	0,45
0,900 - 0,890	40 000	204 000	5,10	0,29	0,69
0,910 - 0,900	350 000	1 660 000	4,74	0,28	4,51
0,920 - 0,910	10 000	44 000	4,40	0,26	0,12
0,930 - 0,920	0	0	0,00	0,00	0,00
0,940 - 0,930	40 000	300 000	7,50	0,38	0,64

Tablo 4.4 Devamı

0,950 - 0,940	0	0	0,00	0,00	0,00
0,960 - 0,950	0	0	0,00	0,00	0,00
0,970 - 0,960	0	0	0,00	0,00	0,00
0,980 - 0,970	0	0	0,00	0,00	0,00
0,990 - 0,980	0	0	0,00	0,00	0,00
1,000 - 0,990	0	0	0,00	0,00	0,00
<b>Toplam</b>	<b>112 270 000</b>	<b>110 976 000</b>	<b>0,99</b>	<b>0,35</b>	<b>21 060,53</b>

Tablo 4.4 incelendiğinde, toplam 75 adet farklı büyüklükte iç içe ocağın başarılı şekilde oluşturulduğu görülmektedir. 25 adet indirgeme faktöründe, bir önceki faktör değerinden yeterince büyük olmadığı için daha büyük bir sınır tespit edilememiştir. Sahadaki toplam 115,3 milyon ton rezervin 112,3 milyon tonunun girilen parametrelere göre ekonomik olarak çıkarılabildiği görülmektedir. Nihai örtü-kazı oranı 0,99 m<sup>3</sup>/ton, ortalama tenör ise %0,35 olarak hesaplanmıştır.

Çıkarılması mümkün olan 112,3 milyon ton cevher için, %8 faiz oranıyla, yıllık 5,6 milyon ton cevher üretimi ile 20 yıl işletme ömrü hedeflendiğinde elde edilen periyot sınırlarına ait sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5 Tungsten madeni verisi için oluşturulan periyot sınırlarına ait sonuçlar

Periyotlar (P)	Cevher Miktarı (ton)	Dekapaj Miktarı (m <sup>3</sup> )	Örtü-Kazı Oranı (m <sup>3</sup> /ton)	Ortalama Tenör (%)	Vade Süresi (1 yıl)	Net Kâr (milyon Amerikan doları)	NBD (milyon Amerikan doları)
P1	5 620 000	5 552 000	0,99	0,22	1	456,23	422,43
P2-P1	5 620 000	5 552 000	0,99	0,25	1	593,96	509,18
P3-P2	5 620 000	5 552 000	0,99	0,28	1	762,33	605,05
P4-P3	5 620 000	5 552 000	0,99	0,27	1	709,90	521,66
P5-P4	5 620 000	5 548 000	0,99	0,40	1	1 284,49	873,89
P6-P5	5 620 000	5 548 000	0,99	0,42	1	1 404,67	884,79
P7-P6	5 620 000	5 548 000	0,99	0,35	1	1 051,37	613,14
P8-P7	5 610 000	5 548 000	0,99	0,38	1	1 204,00	650,11
P9-P8	5 610 000	5 548 000	0,99	0,37	1	1 145,24	572,60
P10-P9	5 610 000	5 548 000	0,99	0,39	1	1 265,42	585,85
P11-P10	5 610 000	5 548 000	0,99	0,32	1	949,45	407,03
P12-P11	5 610 000	5 548 000	0,99	0,37	1	1 133,31	449,88

Tablo 4.5 Devamı

P13-P12	5 610 000	5 548 000	0,99	0,46	1	1 545,38	568,04
P14-P13	5 610 000	5 548 000	0,99	0,35	1	1 042,04	354,67
P15-P14	5 610 000	5 548 000	0,99	0,42	1	1 388,10	437,48
P16-P15	5 610 000	5 548 000	0,99	0,37	1	1 142,02	333,28
P17-P16	5 610 000	5 548 000	0,99	0,36	1	1 124,56	303,89
P18-P17	5 610 000	5 548 000	0,99	0,34	1	1 028,73	257,42
P19-P18	5 610 000	5 548 000	0,99	0,33	1	962,76	223,07
P20-P19	5 610 000	5 548 000	0,99	0,31	1	866,55	185,92
Toplam	112 270 000	110 976 000	0,99	0,35	20	21 060,53	9 759,39

Tablo 4.5 incelendiğinde, nihai ocak sınırındaki 0,99 m<sup>3</sup>/ton örtü-kazı oranının 20 periyotta da elde edildiği görülmektedir. İşletmenin toplam NBD'si 9 759 milyon Amerikan dolarıdır. Sahadaki cevher bloklarının tenör dağılımına bakıldığında ise hesaplanan sonuçlar Tablo 4.6'da verilmektedir.

Tablo 4.6 Tungsten madeni verisine ait tenör dağılım sonuçları

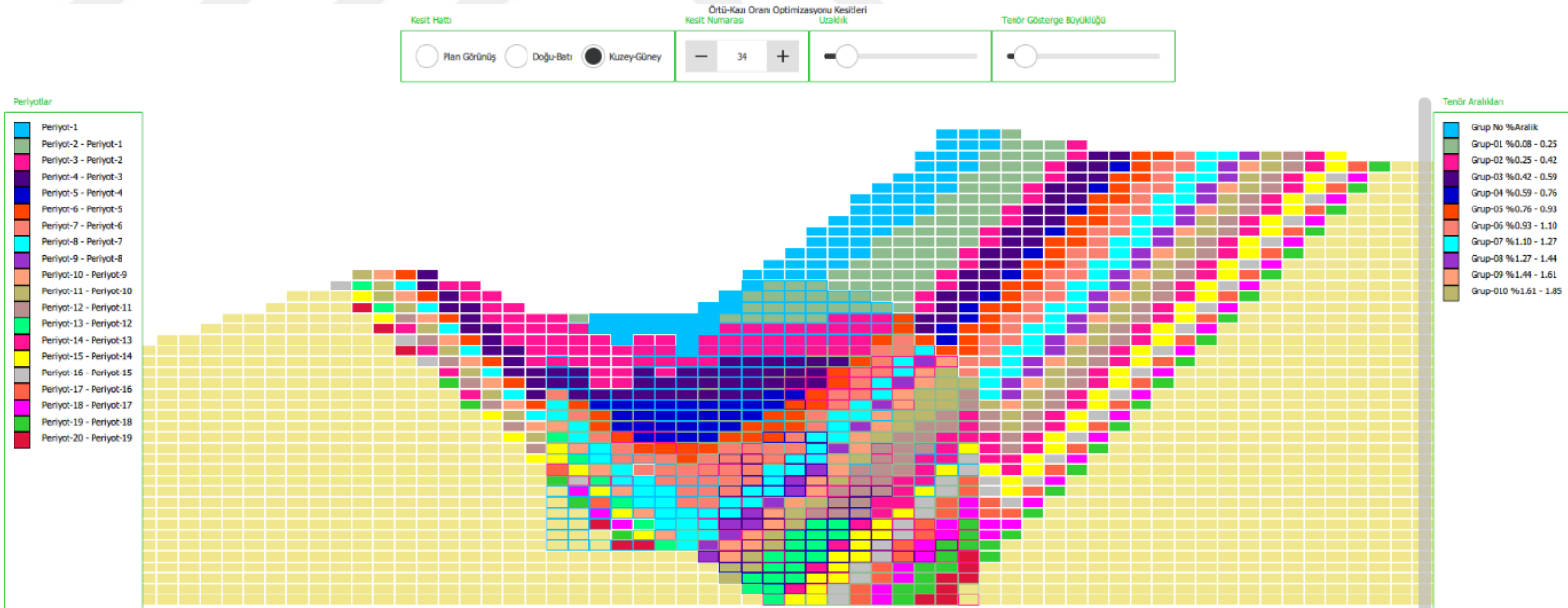
Grup Numarası	Tenör Aralığı (%)	Cevher Bloğu Sayısı	Ortalama Tenör (%)	Standart Sapma (%)	Yüzdesel Dağılım (%)
Grup-01	0,08 - 0,25	3 699	0,17	0,05	32,07
Grup-02	0,25 - 0,42	4 672	0,32	0,05	40,51
Grup-03	0,42 - 0,59	2 021	0,49	0,05	17,52
Grup-04	0,59 - 0,76	748	0,66	0,05	6,49
Grup-05	0,76 - 0,93	297	0,82	0,05	2,57
Grup-06	0,93 - 1,10	70	0,98	0,04	0,61
Grup-07	1,10 - 1,27	13	1,17	0,05	0,11
Grup-08	1,27 - 1,44	10	1,32	0,04	0,09
Grup-09	1,44 - 1,61	2	1,58	0,00	0,02
Grup-10	1,61 - 1,85	2	1,74	0,12	0,02
Toplam	0,08 - 1,85	11 534	0,34	0,18	100,00

Tablo 4.6 incelendiğinde, değerlerin %90,1'inin %0,08 ile %0,59 tenör aralığında olduğu görülmektedir. Verilerin standart sapmasının  $\pm 0,18$  olması ve tenör değerlerinin yaklaşık %0,3 civarında yoğunlaşması sebebiyle sahadaki kalite değerinin homojen bir yapıda olduğunu söylemek mümkündür.

Sonuçlar görselleştirildiğinde periyot sınırlarına ait Doğu-Batı yönü kesit görünüşü Şekil 4.14'te, Kuzey-Güney yönündeki kesit görünüş ise Şekil 4.15'te verilmektedir. Cevherleşme ve tenör dağılımına ait Doğu-Batı yönü kesit görünüşü Şekil 4.16'da, Kuzey-Güney yönündeki kesit görünüş ise Şekil 4.17'de verilmektedir.







Şekil 4.15 Tungsten madeni verisi Kuzey-Güney yönünde periyot sınırları kesit görünüşü



Örtü-Kazı Oranı Optimizasyonu Kesitleri

Kesit Hattı:  Plan Görünüş  Doğu-Batı  Kuzey-Güney

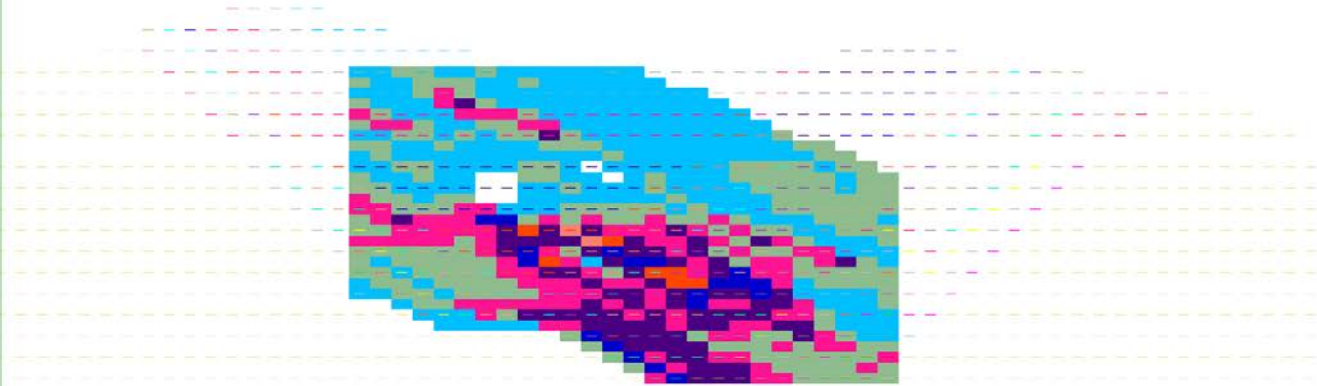
Kesit Numarası:

Lizanslık:

Tenör Göstergesi Rüyaklılığı:

- Periyotlar
- Periyot-1
  - Periyot-2 - Periyot-1
  - Periyot-3 - Periyot-2
  - Periyot-4 - Periyot-3
  - Periyot-5 - Periyot-4
  - Periyot-6 - Periyot-5
  - Periyot-7 - Periyot-6
  - Periyot-8 - Periyot-7
  - Periyot-9 - Periyot-8
  - Periyot-10 - Periyot-9
  - Periyot-11 - Periyot-10
  - Periyot-12 - Periyot-11
  - Periyot-13 - Periyot-12
  - Periyot-14 - Periyot-13
  - Periyot-15 - Periyot-14
  - Periyot-16 - Periyot-15
  - Periyot-17 - Periyot-16
  - Periyot-18 - Periyot-17
  - Periyot-19 - Periyot-18
  - Periyot-20 - Periyot-19

- Tenör Aralıkları
- Grup No %Aralık
  - Grup-01 %0.08 - 0.25
  - Grup-02 %0.25 - 0.42
  - Grup-03 %0.42 - 0.59
  - Grup-04 %0.59 - 0.76
  - Grup-05 %0.76 - 0.93
  - Grup-06 %0.93 - 1.10
  - Grup-07 %1.10 - 1.27
  - Grup-08 %1.27 - 1.44
  - Grup-09 %1.44 - 1.61
  - Grup-010 %1.61 - 1.85



Şekil 4.16 Tungsten madeni verisi Doğu-Batı yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü



Şekil 4.17 Tungsten madeni verisi Kuzey-Güney yönünde cevherleşme ve tenör dağılımı kesit görünüşü

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMA

Bu çalışmada, açık işletmelerde üretim planı optimizasyonu problemine, örtü-kazı oranının sabit olduğu üretim planı oluşturarak farklı bir bakış açısıyla çözüm sunmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda öncelikle nihai ocak sınırının belirlenmesinde daha doğru sonuçlar üreten bir hareketli koni algoritması geliştirilmiştir. Mevcut hareketli koni III algoritmasındaki konilerin birlikte çıkarılmasındaki koni sıralaması iyileştirilmiştir. Ayrıca algoritmanın ocak sınırı güncellendiği durumlarda güncel verilerle tekrar baştan başlaması sağlanarak daha kârlı nihai ocak sınırının oluşturulması başarılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen algoritma, matematiksel olarak doğruluğu kanıtlanmış olan Lerchs ve Grossmann (1965) algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. Umut verici sonuçların elde edildiğinin görülmesinden sonra ise üretim periyot sınırları oluşturulmuştur. Koni çıkarılma sıralamasının geliştirilmesi sayesinde iç içe ocak oluşturma aşamasında mevcut algoritmalarda karşılaşılan açıklık sorununun üstesinden gelinmiştir. Ek olarak BÇS takip edilerek her periyotta mümkün olduğunca eşit cevher üretiminin ve dekapaj kazısının yapılabildiği üretim planı ortaya konmuştur. Geliştirilen yöntem altın ve tungsten olmak üzere iki gerçek madende uygulanmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Gelecek çalışmada, stok sahasını da hesaba katan ve bu sayede dar boğazlarla karşılaşılması durumunda, stok sahasındaki cevherle tenör optimizasyonu yaparak elde edilecek NBD'nin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca her periyotta sabit örtü-kazı oranıyla çalışması yerine, her periyotta giderek artan örtü-kazı oranıyla çalışılan ve bu sayede daha yüksek NBD'lerin elde edilmesini sağlayan bir algoritma geliştirilmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Askari-Nasab, H., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E. ve Kalantari, S. (2011). Mixed integer linear programming formulations for open pit production scheduling. *Journal of Mining Science*, 47(3), 338–359. <https://doi.org/10.1134/S1062739147030117>
- Azzamouri, A., Fénies, P., Fontane, F. ve Giard, V. (2018). Scheduling of open-pit phosphate mine extraction. *International Journal of Production Research*, 56(23), 7122–7141. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1433341>
- Baek, J., Choi, Y. ve Park, H. (2016). Uncertainty Representation Method for Open Pit Optimization Results Due to Variation in Mineral Prices. *Minerals*, 6(1), 17. <https://doi.org/10.3390/min6010017>
- Blom, M., Pearce, A. R. ve Stuckey, P. J. (2018). Multi-objective short-term production scheduling for open-pit mines: a hierarchical decomposition-based algorithm. *Engineering Optimization*, 50(12), 2143–2160. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1429601>
- Blom, M., Pearce, A. R. ve Stuckey, P. J. (2019). Short-term planning for open pit mines: a review. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(5):318–339. <https://doi.org/10.1080/17480930.2018.1448248>
- Burgarelli, H. R., Souza, F. R., Nader, A. S., Torres, V. F. N., Câmara, T. R., Ortiz, C. E. A. ve Galery, R. (2018). Direct block scheduling under marketing uncertainties. *REM: International Engineering Journal*, 71(2). <https://doi.org/10.1590/0370-44672017710128>

- Campos, P. H. A., Cabral, I. E., Ortiz, C. E. A. ve Morales, N. (2018). Comparison between the application of the conventional mine planning and of the direct block scheduling on an open pit mine Project. *REM: International Engineering Journal*, 71(2). <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672017710037>
- Canessa, G., Moreno, E. ve Pagnoncelli, B. K. (2021). The risk-averse ultimate pit problem. *Optimization and Engineering*, 22, 2655–2678. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09545-4>
- Carlson, T. R., Erickson, J. D., O’Brain, D. T. ve Pana, M. T. (1966). Computer techniques in mine planning. *Mining Engineering*, 18(5), 53–56
- Chatterjee, S., Sethi, M. R. ve Asad, M. W. A. (2016). Production phase and ultimate pit limit design under commodity price uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 248(2), 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.012>
- Consuegra, F. R. A. ve Dimitrakopoulos, R. (2010). Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: method, application and comparisons. *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 119(2), 88–101. <https://doi.org/10.1179/037178410X12780655704761>
- Elahi, E., Kakaie, R. ve Yusefi, A. (2012). A new algorithm for optimum open pit design: Floating cone method III. *Journal of Mining & Environment*, 2(2), 118–125. <https://dx.doi.org/10.22044/jme.2012.63>
- Esmail, R., Ehsan, M., Reza, S. ve Mehran, G. (2018). Optimized algorithm in mine production planning, mined material destination, and ultimate pit limit. *Journal of Central South University*, 25, 1475–1488. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3841-5>

- Gholamnejad, J. ve Moosavi, E. (2012). A new mathematical programming model for long-term production scheduling considering geological uncertainty. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112, 77–81
- Gu, X., Wang, Q. ve Shu, G. E. (2010). Dynamic phase-mining optimization in open-pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20–10. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60404-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60404-0)
- Gu, X., Wang, Q., Xu, X. ve Ma, X. (2021). Phase Planning for Open Pit Coal Mines through Nested Pit Generation and Dynamic Programming. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/8219431>
- Hochbaum, D. S. (2008). The Pseudoflow Algorithm: A New Algorithm for the Maximum-Flow Problem. *Operations Research*, 56(4), 992–1009. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0524>
- Meagher, C., Dimitrakopoulos, R. ve Avis, D. (2014). Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem—a review. *Journal of Mining Science*, 50, 508–526. <https://doi.org/10.1134/S1062739114030132>
- Mousavi, A., Kozan, E. ve Liu, S. Q. (2016a). Comparative analysis of three metaheuristics for short-term open pit block sequencing. *Journal of Heuristics*, 22(3), 301–329. <https://doi.org/10.1007/s10732-016-9311-z>
- Mousavi, A., Kozan, E. ve Liu, S. Q. (2016b). Open-pit block sequencing optimization: A mathematical model and solution technique. *Engineering Optimization*, 48(11), 1932–1950. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1142080>
- Nanjari, E. L. ve Golosinski, T. S. (2013). Optimising open pit mine scheduling taking into consideration time value of money and mining restrictions. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 27(3), 156–165. <https://doi.org/10.1080/09658416.2012.655166>

- Lambert, W. B., Brickey, A., Newman, A. M. ve Eurek, K. (2014). Open-Pit Block-Sequencing Formulations: A Tutorial. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 44(2), 127–142. <https://doi.org/10.1287/inte.2013.0731>
- Lamghari, A. ve Dimitrakopoulos, R. (2012). A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 222(3), 642–652. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.029>
- Lamghari, A. ve Dimitrakopoulos, R. (2016). Network-flow based algorithms for scheduling production in multi-processor open-pit mines accounting for metal uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 273–290. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.051>
- Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R. ve Senécal, R. (2021). A matheuristic approach for optimizing mineral value chains under uncertainty. *Optimization and Engineering*, 1573–2924. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09629-9>
- Lerchs, H. ve Grossmann, I. F. (1965). Optimum design of open pit mine. *Transaction CIM*, 58(633), 47–54
- Liu, S. Q. ve Kozan, E. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. *Expert Systems with Applications*, 43, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.044>
- Liu, S. Q. ve Kozan, E. (2019). Integration of mathematical models for ore mining industry. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 6(1), 55–68. <https://doi.org/10.1080/23302674.2017.1344330>
- Picard, J. C. (1976). Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems. *Management Science*, 22, 1268–1272

- Ramazan, S. ve Dimitrakopoulos, R. (2013). Production scheduling with uncertain supply: a new solution to the open pit mining problem. *Optimization and Engineering*, 14(2), 361–380. <https://doi.org/10.1007/s11081-012-9186-2>
- Shishvan, M. S. ve Sattarvand, J. (2015). Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization. *Journal of Mining Science*, 240(3), 825–836. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.040>
- Topal, E. ve Ramazan, S. (2012). Strategic mine planning model using network flow model and real case application. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(1), 29–37. <https://doi.org/10.1080/17480930.2011.600827>
- Upadhyay, S. P. ve Askari-Nasab, H. (2018). Simulation and optimization approach for uncertainty-based short-term planning in open pit mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.003>
- Wright, A. (1999). MOVING CONE II - A simple algorithm for optimum pit limits design. *Proceedings of the 28th Symposium on the Application of the Computers and Operation Research in the Mineral Industries (APCOM)*, 367–374
- Xu, X., Gu, X., Wang, Q., Liu, J. ve Wang, J. (2014). Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(5), 1531–1537. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63222-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63222-2)
- Yarmuch, J. L., Brazil, M., Rubinstein, H. ve Thomas, D. A. (2021). A model for open-pit pushback design with operational constraints. *Optimization and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09699-9>