

## AÇIK OCAK NİHAİ SINIRLARININ BELİRLENMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

<sup>1</sup>Murat ÖZKAN, <sup>2</sup>Selamet G. ERÇELEBİ

<sup>1,2</sup>*Istanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL*

<sup>1</sup> [murat.ozkan@itu.edu.tr](mailto:murat.ozkan@itu.edu.tr), <sup>2</sup> [ercelebi@itu.edu.tr](mailto:ercelebi@itu.edu.tr)

(Geliş/Received: 21.05.2014; Kabul/Accepted in Revised Form: 24.07.2014)

**ÖZET:** Bu çalışmada, madencilikte açık ocak nihai sınırlarının belirlenmesinin önemi ve bu amaçla kullanılan blok model kavramı incelenmiştir. Daha sonra açık ocak nihai sınırlarını bulmak için sık kullanılan yöntemlerden Dinamik Programlama, Grafik Teorisi, Hareketli Koni Algoritması ve Maksimum Akış Algoritması detaylı olarak incelenmiştir. Bu dört yöntem kullanılarak iki boyutlu bir blok model örneği üzerinde uygulama yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yöntemlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Açık Ocak Nihai Sınırları, Lerchs-Grossmann Algoritması, Grafik Teorisi, Hareketli Koni Algoritması, Maksimum Akış Algoritması

### Ultimate Pit Limit Determination Methods

**ABSTRACT:** In this study, the importance of determining the ultimate pit limits and block model concept used for this purpose, were examined. Then Dynamic Programming, Graph Theory, Maximum Flow Algorithm and Moving Cone Algorithm which are commonly used to find the pit limits were examined in detail. A two-dimensional block model example is optimized by using above 4 methods, and the results obtained are compared. According to the results obtained, advantages and disadvantages of the methods are outlined.

**Key Words:** Ultimate Pit Limits, Lerchs-Grossmann Algorithm, Graph Theory, Moving Cone Algorithm, Maximum Flow Algorithm

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Madencilikte karar verme aşamalarından en önemlisi üretim yönteminin belirlenmesidir. Eğer bu aşamada açık ocak üretim yöntemine karar verilmişse, açık ocak işletmesinin nihai sınırları henüz başlangıç aşamasında iken belirlenmelidir. Açık ocak nihai sınırlarının tespit edilmesi, ocağın başlangıç aşamasından ocağın ömrünün sonuna kadar yapılacak olan bütün planlama ve faaliyetleri doğrudan etkilemektedir.

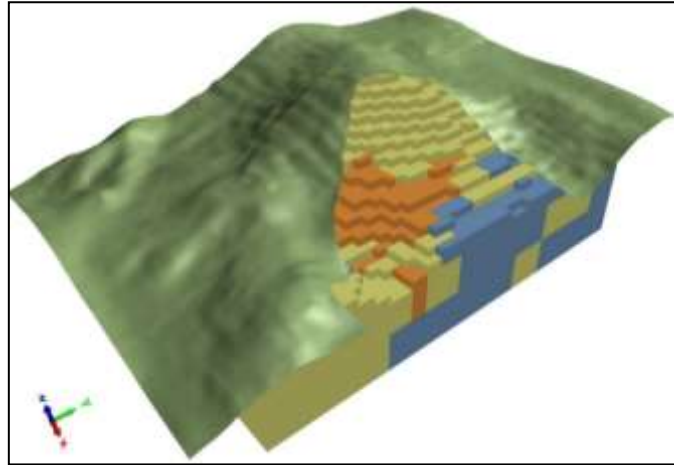
Açık ocak nihai sınırlarının bulunması amacı ile birçok algoritma ve yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler sayesinde ocak sınırları belirlenebilmekte ve bu sınırlara göre üretim planlaması yapılabilmektedir. Açık ocak sınırlarının belirlenmesi ile kurulacak tesislerin ve dekapaj sahasının konumu gibi kritik seçimler sağlıklı bir şekilde yapılabilir. Böylece işletmede

öngörülemeyen ek masraflarla karşılaşılması engellenmiş olur. Açık ocak optimum nihai sınırlarını bulmak amacıyla kullanılan yöntemlerde genellikle blok model kullanılmaktadır.

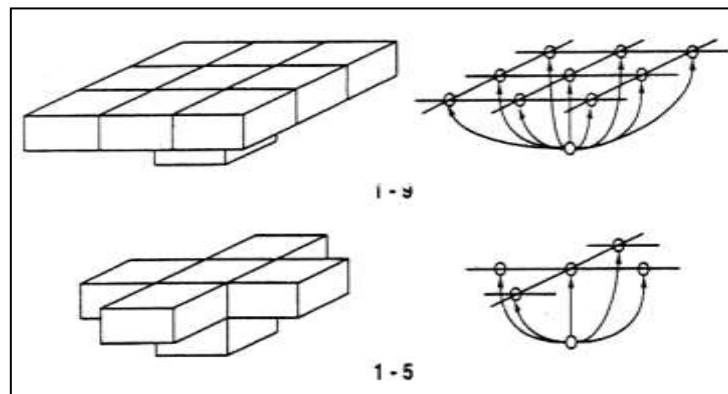
### Blok Model (Block Model)

Bir blok model, cevher yatağının ve yanındaki diğer jeolojik formasyonların küçük bloklara ayrılmasıyla oluşur. Bloklar geometrik şekillerden oluşur. Örneğin 2 boyutlu bloklar kare veya dikdörtgen, 3 boyutlu bloklar küp veya dikdörtgenler prizması şeklindedir. Her bir blok, bulunduğu konumun jeolojik, fiziksel ve ekonomik özelliklerini temsil eder. Örnek bir blok model Şekil 1'de gösterilmiştir. Blok içeriğindeki hacim, rezerv, tenör gibi değişkenlerin kolaylıkla hesaplanabilmesi ve ekonomik değerlerin kolaylıkla elde edilebilmesi amacıyla blok model kullanımı tercih edilmektedir.

Nihai ocak sınırlarını belirlemeye yönelik çalışmalarda bir bloğu alabilmek için üzerindeki blokların da alınması gerektiği prensibi vardır. Örneğin iki boyutlu bir blok modelde bir bloğu çıkarabilmek için üzerindeki 3 blok öncelikli olarak alınmalıdır. Üç boyutlu uygulamalarda ise Şekil 2'de görüldüğü gibi bir bloğun çıkarılabilmesi için üzerindeki 5 blok veya 9 bloğun çıkarılması gerektiği düşünülerek hesaplamalar yapılır (Laurent ve ark., 1977).



Şekil 1. Örnek Bir 3-Boyutlu Blok Model (3D Example Block Model)



Şekil 2. Blok Kısıtlamaları için 1-9 ve 1-5 Modellerinin Temsili Görünümü (Representation of Block Constraints for 1-5 and 1-9 Model) (Laurent ve ark., 1977)

Blok model, cevher yatağının boyutuna göre ve seçilen blok boyutlarına göre milyonlarca bloktan oluşabilir. Bir blok modelde bloklara atanan değişkenler, blokların çevresinde yer alan

sondajlardan elde edilir. Optimizasyon çalışmalarında bloklara atanan değişkenlerden en önemli olanı tenör değerleridir. Tenör değerleri, özellikle bir bloğun cevher kazısı veya dekapaj kazısı olarak değerlendirilmesinde çok etkilidir. Ayrıca tenör değerleri bir bloğun ekonomik değerinin hesaplanmasında ve tesislere beslenecek cevher kalitesinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bloklara tenör değerlerinin atanmasında en çok kullanılan yöntemler Ağırlıklı ters mesafe yöntemi (Inverse distance weighting) ve jeostatistiksel yöntemlerdir. Bloklara tenör değerlerinin atanmasından sonra her bloğun ekonomik değeri belirlenebilir hale gelir. (Davey, 1979; Davey ve Switzer, 1979; Dunlop, 1979; Kim, 1979; Clark, 1979; Erarslan, 1996).

#### **Blokların Ekonomik Değeri** (Block Economical Value)

Bir bloğun ekonomik değerini belirleyen temel parametreler maliyet ve gelirlerdir. Blok ekonomik değerlerinin hesaplanmasında kullanılan birim maliyet, benzer özellikteki ocaklar gözönünde bulundurularak, cevher satış fiyatı ise güncel fiyatlar kullanılarak bulunur (Carlson ve ark., 1966; Crawford ve Davey, 1979; Kosovac ve Kundu, 1978; Rychkun ve Chen, 1979; Crawford, 1979). Bir cevher bloğuna verilen ekonomik değer, bloktan elde edilen gelirden madencilik ve zenginleştirme maliyetlerinin çıkarılmasıyla elde edilir. Bir dekapaj bloğunun ekonomik maliyet değeri ise sadece kazı, nakliye ve döküm maliyeti olarak düşünülebilir (Erarslan, 1996). Bir bloğun ekonomik değerinin formülü genel olarak Eşitlik 1 ve 2'de verilmiştir.

$$EBV_{Ore} = GR \times T \times R \times (MP - SC) - (T \times PC) - (T \times MC) \quad (1)$$

$$EBV_{Waste} = -(WT \times WMC) \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2'de belirtilen parametreler aşağıda sırasıyla ifade edilmiştir.

EBV (Economic Block Value)	; Blok Ekonomik Değeri (TL/blok)
GR (Grade)	; Blok Ortalama Tenörü (%)
T (Tonnage)	; Bloktaki Tüvenan Cevher Miktarı (ton)
R (Recovery)	; Metal Kazanım Yüzdesi (%)
MP (Metal Price)	; Metal Satış Fiyatı (TL/ton)
SC (Selling and Marketing Cost)	; Satış Maliyeti (TL/ton)
PC (Processing Cost)	; Cevher Hazırlama Maliyeti (TL/ton)
MC (Mining Cost)	; Kazı Maliyeti (TL/ton)
WT (Waste Tonnage)	; Bloktaki Dekapaj Miktarı (ton)
WMC (Waste Mining Cost)	; Dekapaj Kazı Maliyeti (TL/ton)

#### **AÇIK OCAK NİHAİ SINIRLARININ BULUNMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER** (ULTIMATE PIT LIMIT DETERMINATION METHODS)

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

- Dinamik Programlama (Dynamic Programming)
- Hareketli Koniler Yöntemi (Moving Cone or Floating Cone)
- Grafik Teorisi (Graph Theory)
- Maksimum Akış Algoritması (Maximum Flow Algorithm)

Tamsayı Programlama (Integer Programming)  
 Doğrusal Programlama (Linear Programming)  
 Ulaştırma Algoritması (Transportation Algorithm)  
 Genetik Algoritması (Genetic Algorithm)

Günümüzde optimum sonucu vermesi açısından en çok kullanılan yöntem, ilk olarak Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından kullanılan Dinamik Programlama ve Grafik Teorisi'dir. Bu algoritmaları kullanım kolaylığı açısından Hareketli Koni yöntemi (Moving Cone or Floating Cone) ve Maksimum Akış Algoritması (Maximum Flow Algorithm) takip eder. Ülkemizde de birçok araştırmacı tarafından bu yöntemler üzerinde çalışmalar ve uygulamalar yapılmıştır (Yalçın, 1991; Eevli, 1992; Onur, 1995; Yalçın ve Saydam, 1995; Erarslan, 1996; Özkan, 2006; Özkan ve Erçelebi, 2007). Bu dört yöntemden Grafik Teorisi ve Hareketli Koni yöntemi açık ocak nihai sınırlarını bulmak amacıyla birçok madencilik programında (Micromine, Surpac, Vulcan, NPV Scheduler) tercih edilmektedir. Aşağıda bu dört yöntemin nasıl uygulandığı konusunda bilgiler verilmiştir.

### 1. Dinamik Programlama (Dynamic Programming)

Bir Yöneylem Araştırması (Operations Researchs) yöntemi olan Dinamik Programlama (Dynamic Programming), açık ocak nihai sınırlarının bulunması amacıyla ilk defa Lerchs ve Grossmann (1965) tarafından kullanılmıştır. Lerchs ve Grossmann (1965) öncelikle 2 boyutlu kesitler üzerinde hesaplamalar yapmış daha sonra bu kesitleri 3 boyutlu ocak oluşturmak amacıyla bir araya getirmişlerdir (Lerchs ve Grossmann, 1965).

Dinamik programlama yöntemi ile açık ocak sınırlarının bulunması için kullanılan temel adımlar 2 boyutlu bir kesit (Şekil 3) üzerinde şöyle özetlenebilir (Lerchs ve Grossmann, 1965);

Adım:  $ijk$  koordinat sisteminde (Şekil 3a);  $i$  no'lu kesitte,  $j$  no'lu sütun ve  $k$  seviyesi için,  $m_{ijk}$ , bir bloğun ekonomik değerini temsil etmektedir.

Adım: Her  $ijk$  bloğu için yukarıdan başlayarak aşağıya doğru ekonomik değerler toplanarak aynı bloğa yazılır (Eşitlik 3, Şekil 3b).

$$M_{ijk} = \sum_k m_{ijk} \quad (3)$$

Adım: Sütunların en soluna  $j=0$  blokları, satırların üzerine de  $k=0$  blokları eklenir (Şekil 3c). Sonradan eklenen bu blokların değerleri sıfırdır.

Adım: En sol üst köşedeki bloktan başlanarak  $P_{jk}$  değerleri bulunur ( $i$  sabit).  $P_{jk}$  değeri bir bloğun solunda yer alan üç komşu bloğun incelenmesiyle ortaya çıkar. Bu üç blok içerisinde ekonomik değeri en büyük olan blokla incelenen bloğun değeri toplanır. Ardından değeri büyük olan bu bloğa doğru bir ok çizilir (Eşitlik 4, Şekil 3c).

$$P_{jk} = M_{jk} + \max(P_{j-1,k-1}, P_{j-1,k}, P_{j-1,k+1}) \quad (4)$$

Adım: Bütün bloklar incelendikten sonra  $k=1$  seviyesindeki  $P_{max}$  değeri bulunur ve bu değer iki boyutlu kesit için maksimum ocak değerini verir (Eşitlik 5, Şekil 3c). Bu bloktan başlanarak ok işaretlerinin gösterdiği bloklar takip edilir. Bu bloklar, incelenen kesit için nihai sınırları gösteren bloklardır. Eğer  $k=1$  seviyesinde pozitif değerli bir blok yoksa işletmeyi kara geçirecek bir üretim mevcut değil demektir.

$$P_{max} = \text{Max}P_{ij} \quad (5)$$

Dinamik Programlama Yöntemi, kolay anlaşılabilirliği ve bilgisayar ortamında kolay kodlanabilirliği nedeniyle sıklıkla kullanılan ve uygulanan bir yöntem olmuştur. Bu yöntem, 2 boyutlu kesitlerde hızlı bir şekilde ve kesin doğrulukta sonuçlar vermesine rağmen 2 boyutlu

kesitten 3 boyutlu ocak oluşumuna geçişte uyumsuzluk sorunları oluşturmuş ve daha sonra bu sorun üzerine değişik algoritmalar geliştirilmiştir (Johnson ve Sharp, 1971, Barnes, 1982, Koenigsberg, 1982). Bu yöntemler de nihayetinde orijinal Lerchs-Grossmann Algoritmasına (1965) dayanmaktadır. 2 boyutlu kesitler üzerinden 3 boyutlu aşamaya geçerken kesitler üzerindeki nihai sınırların birbiriyle uyumsuz olmasından kaynaklanan sorunlar, bu çalışmalar sayesinde giderilebilse de bazen optimum olmayan sonuçlar vermesini engelleyememektedir. Bu tarz yaklaşımlar problemi azaltma konusunda işe yarasa da, tamamen ortadan kaldırma açısından yeterli değildir (Erarslan, 1996).

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

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

**(a)**

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

**(b)**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	-2	-2	-2	-2	-2	0	+6	+9 max.
2	0	-5	-5	-3	-2	+2	+8	+11	+6
3	0	-9	-12	-2	+2	+6	+10	+7	+2

**(c)**

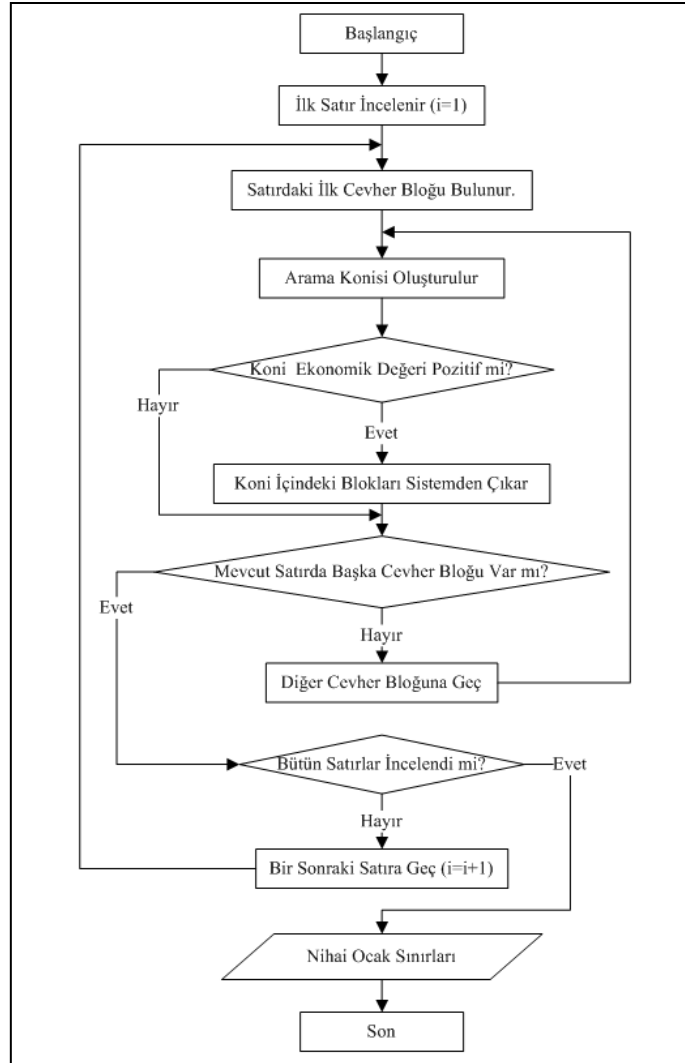
**Şekil 3.** Lerchs-Grossmann Dinamik Programlama Algoritması (Lerchs-Grossmann Dynamic Programming Algorithm) (1965)

### 2.Hareketli Koni Yöntemi (Moving Cone Method)

Açık ocak nihai sınırlarının bulunmasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olan Hareketli Koni Yöntemi (Moving Cone, Floating Cone) ilk olarak Pana (1965) tarafından kullanılmıştır.

Bu yöntem uygulanırken uç kısmı aşağıya bakan bir arama konisi kullanılır. Koninin aşağıya bakan uç kısmı, pozitif ekonomik değere sahip blok veya blok kümelerini bulmak amacıyla cevher blok modelindeki her bloğun merkezinde konumlanır. Bu koni, aslında ocağın şev açılarını temsil etmektedir. Kullanılan koni en üst ve sol sıradaki bloktan başlayarak her bir cevher bloğu üzerinde durarak koninin içerisinde kalan blokların ekonomik değerlerini hesaplar. Eğer koni içerisinde kalan blok veya blokların ekonomik değeri pozitif ise bu blok veya blokların ekonomik ocak sınırları içerisinde yer alması gerektiği düşünülür. Mevcut koni, bütün cevher blokları üzerinde hareket ettikçe pozitif değeri veren blok veya blok kümeleri

sistemden çıkarılır ve nihai ocak sınırlarını oluşturan blok veya bloklar olarak kaydedilir. Böylece bütün cevher blokları üzerinde deneme yanılma yoluyla analiz yapılmış olur. Yöntemin akış şeması Şekil 4'te verilmiştir (Wright, 1990).



Şekil 4. Hareketli Koni Yönteminin Akış Şeması (Moving Cone Method Flow Chart) (Wright, 1990)

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

### 3. Maksimum Akış Algoritması (Maximum Flow Algorithm)

Bu algoritma, Ford ve Fulkerson Algoritması (1956) üzerinde geliştirilmiş ve ilk olarak Johnson (1968) tarafından kullanılmıştır ve daha sonra Barnes (1982) tarafından başarıyla uygulanmıştır. Yegulalp ve Arias (1992) ağ akış modellerini maksimize eden birçok algoritmayı sıralamıştır.

Bir ağ (network), düğüm noktaları, arklar ve bu arklara atanmış olan ve kapasite denilen değerlerden oluşur. Şekil 5 tipik bir ağ modelini göstermektedir. Böyle bir ağ modeli aşağıdaki adımlar takip edilerek çözülebilir (Ataee-Pour, 2000).

Ağ modelinde her blok bir düğüm noktası tarafından temsil edilir.

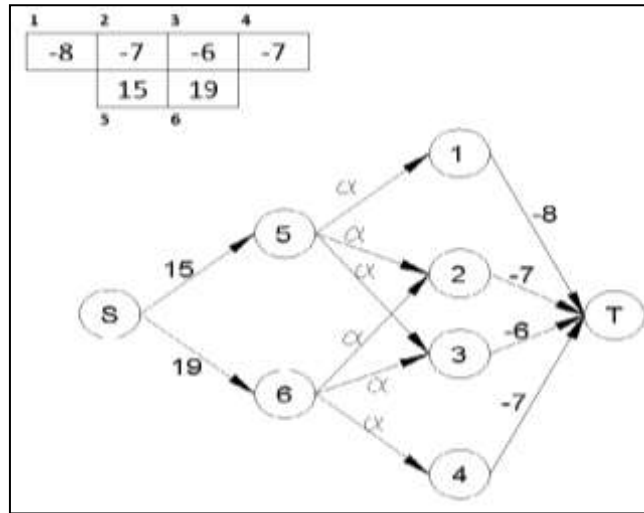
İki yapay düğüm noktası ağ modeline eklenir. Bunlar kaynak (source) ve terminal (sink) olarak isimlendirilir.

Pozitif bloklara karşılık gelen düğüm noktalarına kaynak düğüm noktasından çıkan arklar yönlendirilir. Buradaki her arkın akış kapasitesi temsil ettiği bloğun ekonomik değeri kadardır.

Negatif veya sıfır değerli düğüm noktalarından terminal düğüm noktasında doğru arklar oluşturulur. Bu arkların kapasiteleri ise blokların negatif değerlerinin mutlak değerleri kadardır.

Pozitif düğüm noktalarından, negatif veya sıfır değerli düğüm noktalarına doğru arklar oluşturulur. Burada önemli olan kısım herhangi bir pozitif bloğun alınabilmesi için hangi pozitif olmayan blokların alınması gerektiğinin arklarla gösterilmesidir. Bu arkların kapasiteleri ise sonsuzdur.

Bu ağ modelinde amaç kaynak noktasından terminal noktasına olan akışı maksimize etmektir. Elde edilen sonuç ile nihai ocak sınırları içerisinde kalan bloklar bulunmuş olur.



Şekil 5. Temsili Bir Maksimum Akış Algoritması (Representation of Maximum Flow Algorithm)

#### 4.Grafik Teorisi (Graph Theory)

Dinamik programlama yönteminin 3 boyutlu uygulamalarda yetersiz kalmasından dolayı Lerchs ve Grossmann (1965) açık ocak nihai sınırlarının bulunmasında Grafik Teorisi'nin (Graph Teorisi) kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.

Grafik Teorisi'nde amaç, yönlendirilmiş-ağırlıklandırılmış arklar (directed-weighted arcs) ile maksimum kapanımı (maximum closure) veren blokları elde etmektir. Bloklar düğüm noktaları (nodes) olarak temsil edilir. Düğüm noktaları arasındaki yönlendirilmiş arklar (directed arcs), bloklar arasındaki ilişkiyi gösterir. Bu arklar bir blok çıkarılmadan önce üzerindeki hangi blokların çıkarılması gerektiğini belirtir. Arklar bazı etiketleme (labelling) işlemlerinden geçirilir. Bu süreç belli kurallar çerçevesinde yapılır ve normalleştirme (normalization) olarak adlandırılır. Normalleştirme işlemleri, kök düğüm noktasına (dummy root) bağlı güçlü dal (strong branch) kalmayınca kadar devam eder.

Grafik teorisi optimum nihai sınırları hatasız olarak verdiği için daha sonra yapılan diğer çalışmalar yöntemin uygulanmasına ve daha hızlı çalışmasına yöneliktir (Lipkewich ve Borgman, 1969; Chen, 1976; Huttagosol, 1988; Whittle, 1988; Zhao ve Kim, 1990; Zhao ve Kim, 1992; Cai, 1992).

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

Yukarıda açıklanan 4 yöntemin genel olarak avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir; Dinamik Programlama yöntemi, kullanımı kolay ve uygulanması hızlıdır.

Dinamik Programlama yöntemi, 2 boyutlu modellerde doğru sonuçlar vermekle birlikte bazen 3 boyutlu uygulamalarda optimum sonuçları verememektedir.

Hareketli koni yöntemi, diğer yöntemlere göre anlaşılması, kullanılması ve programlanması açısından çok kolaydır. Bilgisayar programları üzerinde hızlı bir şekilde çalışabilmektedir.

Hareketli Koni Yönteminin dezavantajı ise 2 farklı kusurunun bulunmasıdır. Bunlar; farklı konilerin kesişiminden oluşan ekonomik değer hesaplanamaması ve koninin şeklinden dolayı pozitif değerli kombinasyonların fark edilememesi ayrıca pozitif değerli blok kümesinin içerisinde alınmaması gereken negatif değerli blokların da alınmasıdır.

Maksimum Akış Algoritması her zaman optimum çözümü garanti etmekte fakat 3 boyutlu büyük problemlere uygulanması, programlanması ve çözüm zamanı açısından güçlükleri olması nedeniyle bir çok maden tasarım programı tarafından tercih edilmemektedir.

Grafik Teorisi, diğer yöntemlere göre anlaşılması, uygulaması ve programlanması zordur.

Grafik Teorisi, geçmişte bilgisayar uygulamalarında işlemci ve hafıza açısından yetersiz kalmaktaydı ancak günümüz bilgisayarlarıyla milyonlarca blok içeren bir cevher yatağında rahatlıkla uygulanabilmektedir.

Grafik Teorisi ve Maksimum Akış Algoritması, diğer yöntemlere göre kesin doğruluktadır ve optimum nihai sınırları vermektedir. Bu iki yöntem de farklı şev açlarına uyum sağlayabilmektedir.

## BİR ÖRNEK ÜZERİNDE YÖNTEMLERİN UYGULANMASI (APPLICATION OF METHODS ON AN EXAMPLE)

Yöntemlerin karşılaştırılması amacıyla oluşturulan ve toplam 65 blok içeren (5 satır, 13 sütun) 2 boyutlu bir blok model (Şekil 6) uygulama amacıyla kullanılmıştır. Bu örnek modelde 24 cevher bloğu ve 41 dekapaj bloğu bulunmaktadır. İçeriğindeki cevher ve dekapaj miktarlarına göre her bloğun ekonomik değeri üzerine yazılmıştır.

-1	-1	-1	1	-1	-2	-2	-1	-1	2	-1	-1	-1
-1	-1	3	2	1	-1	-2	-1	2	3	2	-1	-2
-2	-1	1	1	2	1	-2	2	1	2	-1	-1	-1
-1	-1	-2	1	1	1	1	1	1	1	-1	-2	-1
-2	-1	-1	-2	2	-1	-1	-2	1	-2	-1	-1	-2

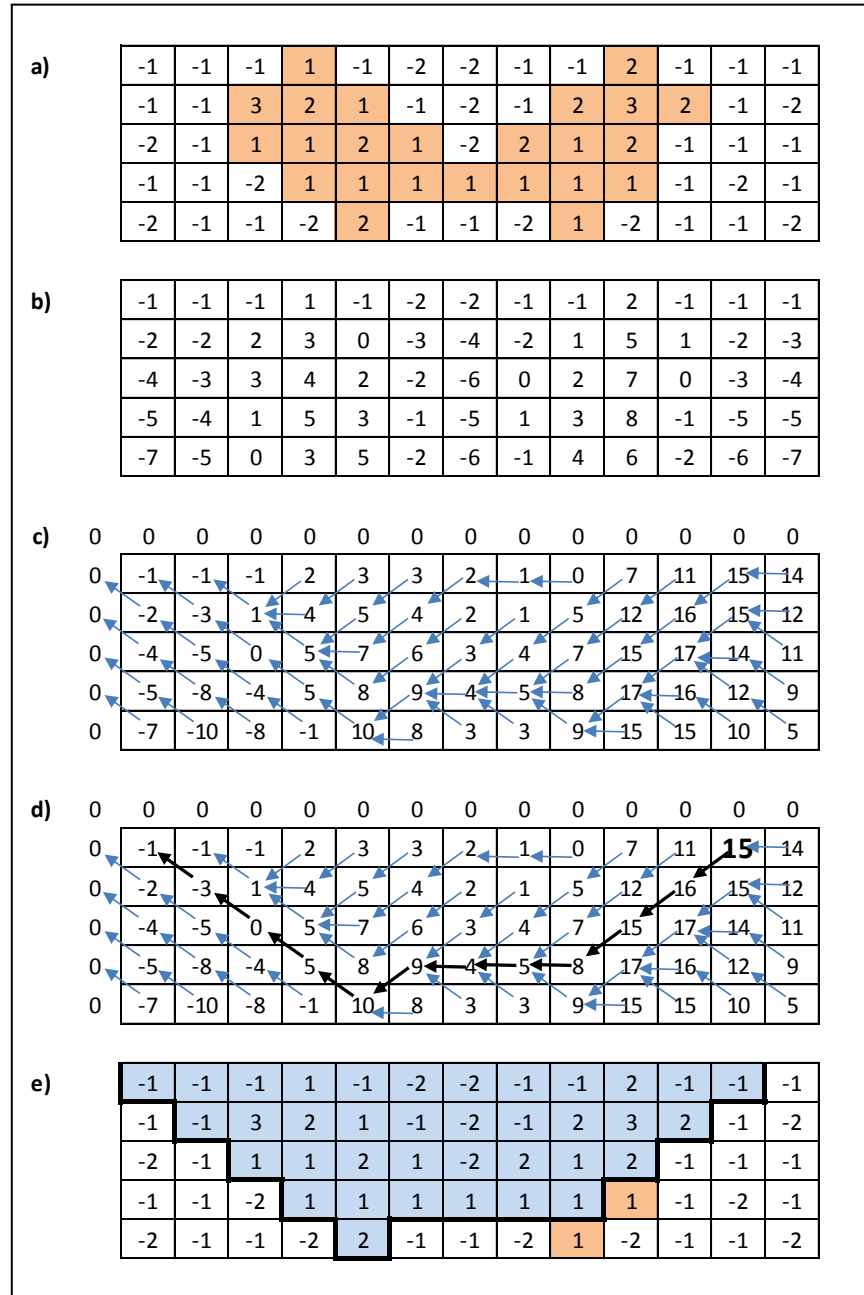
Şekil 6. Uygulama için Kullanılacak Blok Model (Block Model for Application)



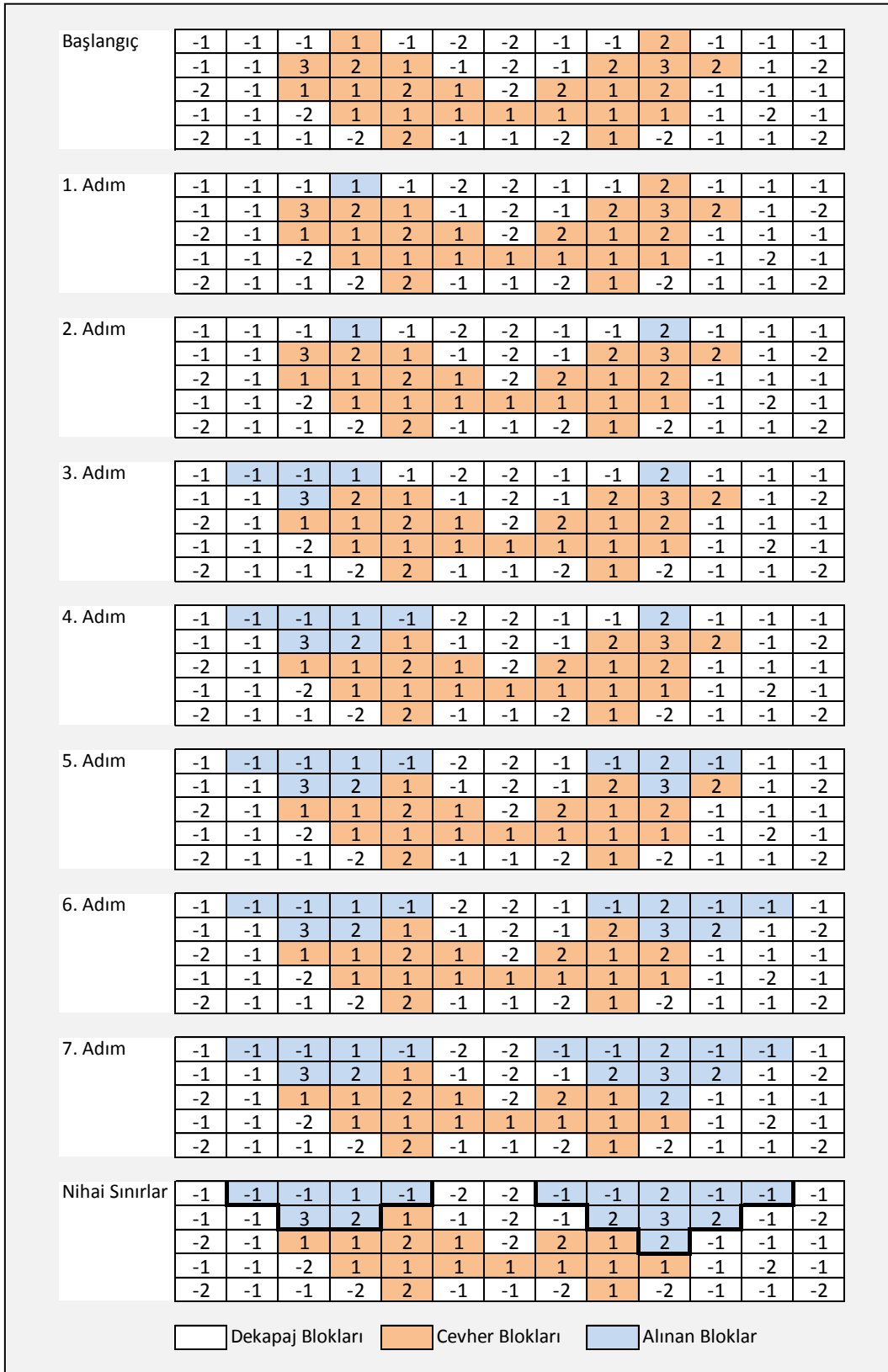
Bu blok model üzerinde ilk olarak Dinamik Programlama (Lerchs-Grossmann Algoritması) tekniği uygulanmıştır. Bu yöntem uygulanırken Microsoft Excel programı üzerinde çalışılmıştır. Blokların başlangıçtaki görünümü Şekil 7.a'da görülmektedir. Her sütun için alınan kümülatif blok değerleri ise Şekil 7.b'de gösterilmiştir. Bir sonraki aşamada her bloğun solundaki üç blok incelenmiş ve ekonomik değeri yüksek olan blok yönünde oklar çizilmiştir. Daha sonra bu okların gösterdiği blok ile mevcut bloğun değeri toplanmış ve yerine yazılmıştır (Şekil 7.c). Bu işlem bittikten sonra ilk satırda yer alan maksimum pozitif değerden başlayan ok işaretleri takip edilmiş ve ocağın nihai sınır çizgileri oluşturulmuştur (Şekil 7.d). Bu sınır içerisinde kalan bloklar ise alınması gereken blokları vermektedir (Şekil 7.e). Böylece kesit üzerindeki ocak nihai sınırları ve alınacak olan bloklar belirlenmiş olur. Sağ alt köşede kalan iki cevher bloğu alınmadan bırakılmıştır.

Aynı blok model üzerinde ikinci olarak Hareketli Koni Yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem uygulanırken yine Microsoft Excel programı üzerinde çalışılmıştır. En sol üst köşeden başlanarak cevher blokları üzerinde durulmuş ve oluşturduğu koni içerisinde kalan blokların ekonomik değerlerinin pozitif olması durumunda bu bloklar alınmıştır. Şekil 8'de birinci adımda alınacak +3 ekonomik değerine sahip blok görülmektedir. Bu blok sistemden dışarı alınarak tekrar hesaplanmaması gerekir. Bir sonraki adımda +2 değerlikli blok alınmıştır. Bir alt satıra geçilerek yine soldan başlanmış ve +3 değerlikli blok üzerinde koni oluşturulmuştur. Bu koni içerisinde kendisi (+3), bir üstteki blok (-1) ve bir üst-soldaki blok (-1) bulunmaktadır. Koninin toplam değeri +1 olduğu için bu bloklar da alınmıştır. Bu şekilde devam edilerek bütün cevher blokları incelenmiş ve alınan bloklarla nihai ocak sınırları oluşturulmuştur (Şekil 8).

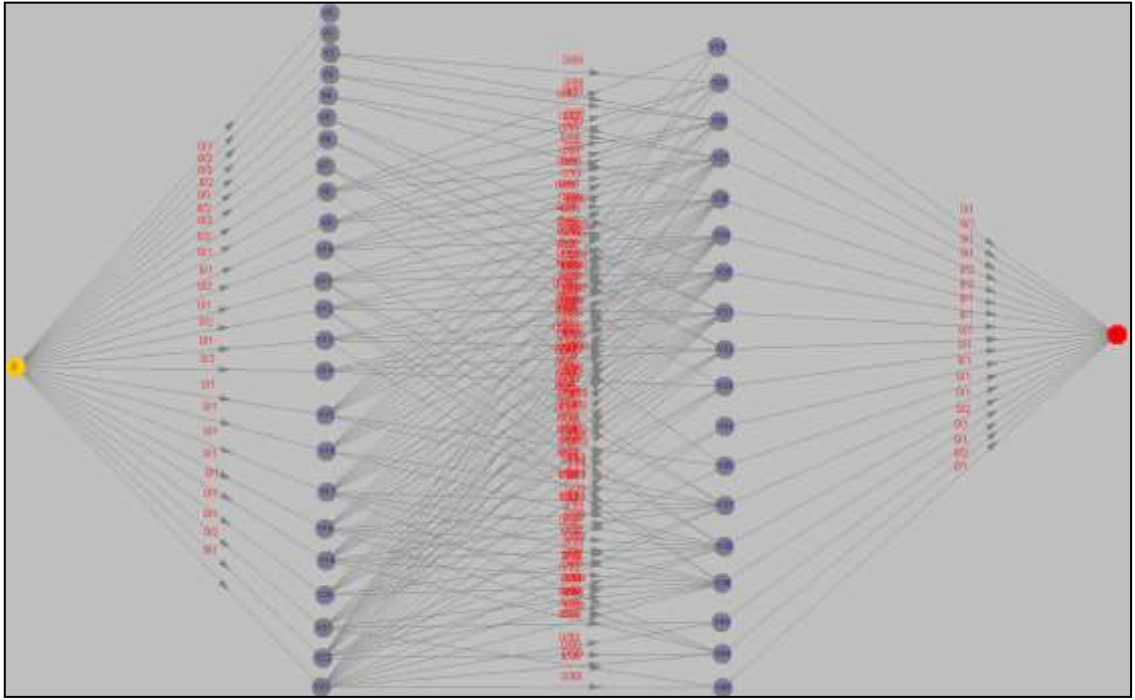
Üçüncü olarak blok model üzerinde maksimum akış tekniği uygulanmıştır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için <http://www.cse.yorku.ca/~aaw/Wang/MaxFlowStart.htm> adresli internet sitesinden faydalanılmıştır. Bu yöntemde öncelikle blok modelin bir ağ akış modeline dönüştürülmesi gerekmektedir. Her bir blok bir düğüm noktası (node) olacak şekilde ve pozitif bloklar sol tarafta yer alacak şekilde model kurulur. Yönlendirilmiş kapasiteli arklar model üzerine yerleştirilir. Bir kaynak (Source) ve bir terminal düğüm noktası oluşturulur (Şekil 9). Kaynak noktasından pozitif değerli bloklara doğru yerleştirilen arkların ve pozitif olmayan bloklardan terminal noktasına doğru yerleştirilen arkların kapasiteleri blokların mutlak değerleri kadardır. Pozitif değerli bloklardan pozitif olmayan bloklara doğru yerleştirilen arkların kapasiteleri ise sonsuzdur. Ağ modeli oluşturulduktan sonra çözüm işlemlerine başlanır. İterasyonlar sonucunda nihai sınırlar içerisinde kalan bloklar belirlenir (Şekil 10). Bu yöntemin kullanılması ile elde edilen nihai sınırlar Şekil 11'de gösterilmiştir.



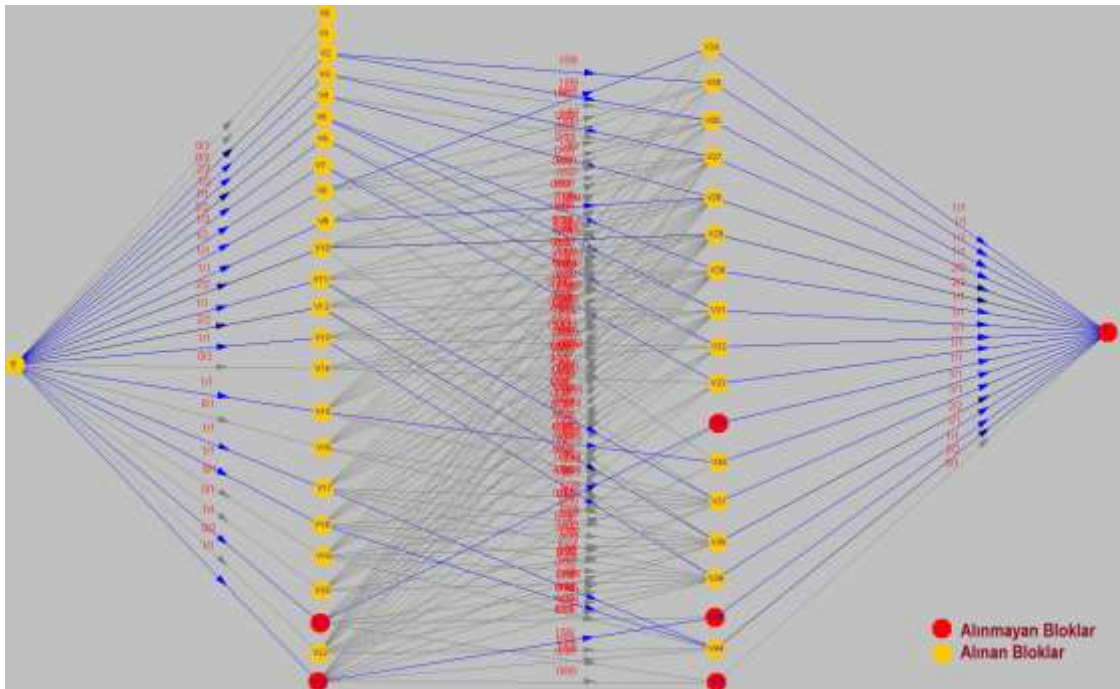
Şekil 7. Dinamik Programlama ile Çözüm (Solution with Dynamic Programming)



Şekil 8. Hareketli Koni Yöntemi ile Çözüm (Solution with Moving Cone)



Şekil 9. Maksimum Akış Algoritması Başlangıç Görünümü (Initial View of Maximum Flow Algorithm)

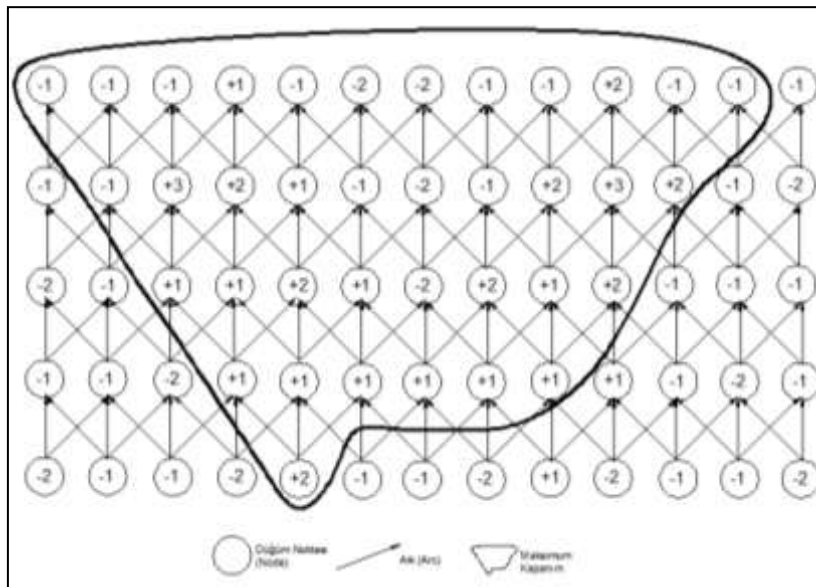


Şekil 10. Maksimum Akış Algoritması ile Çözüm (Solution with Maximum Flow Algorithm)

-1	-1	-1	1	-1	-2	-2	-1	-1	2	-1	-1	-1
-1	-1	3	2	1	-1	-2	-1	2	3	2	-1	-2
-2	-1	1	1	2	1	-2	2	1	2	-1	-1	-1
-1	-1	-2	1	1	1	1	1	1	1	-1	-2	-1
-2	-1	-1	-2	2	-1	-1	-2	1	-2	-1	-1	-2

Şekil 11. Maksimum Akış Algoritması ile Nihai Ocak Sınırları (Pit Limits Using Maximum Flow Algorithm)

Son olarak Grafik Teorisi ile nihai sınırlar bulunmuştur. Bu yöntem ile problemi çözebilmek için Hustrulid ve Kuchta (2006)'dan faydalanılmıştır. Oluşturulan ağın görünümü ve maksimum kapanımı veren bloklar Şekil 12'de gösterilmiştir. Bu kapanım içerisinde kalan bloklar nihai sınır içerisinde kalan bloklardır (Şekil 13).



Şekil 12. Grafik Teorisi ile Bulunan Maksimum Kapanım (Maximum Closure using Graph Theory)

-1	-1	-1	1	-1	-2	-2	-1	-1	2	-1	-1	-1
-1	-1	3	2	1	-1	-2	-1	2	3	2	-1	-2
-2	-1	1	1	2	1	-2	2	1	2	-1	-1	-1
-1	-1	-2	1	1	1	1	1	1	1	-1	-2	-1
-2	-1	-1	-2	2	-1	-1	-2	1	-2	-1	-1	-2

Şekil 13. Grafik Teorisi ile Nihai Ocak Sınırları (Pit Limits using Graph Theory)

## SONUÇLAR ÜZERİNDE GENEL BİR DEĞERLENDİRME (AN OVERALL ASSESSMENT OF THE RESULTS)

Detaylı olarak anlatılan 4 farklı yöntemin bir örnek üzerinde çözülmesiyle elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de verilmiştir. Çizelge 1’den de görüldüğü gibi Dinamik Programlama yöntemi, Maksimum Akış algoritması ve Grafik Teorisi ile elde edilen sonuçlarda 65 bloktan 22 cevher bloğu ve 15 dekapaj bloğu olmak üzere toplam 37 blok alınmış ve bu blokların toplam ekonomik değeri 15 birim olarak belirlenmiştir. Hareketli Koni yöntemi ise diğer yöntemlere göre nihai sınırları daha az blok olarak oluşturmuş, optimum sonuca ulaşamamış ve ocağın toplam ekonomik değerini 10 birim olarak vermiştir.

**Çizelge 1.** Sonuçların Karşılaştırılması (Comparison of the Results)

Yöntem	Blok Modeldeki Blok Sayısı	Nihai Sınırlar İçerisinde Kalan Cevher Bloğu Sayısı	Nihai Sınırlar İçerisinde Kalan Dekapaj Bloğu Sayısı	Nihai Sınırlar İçerisinde Kalan Toplam Blok Sayısı	Nihai Sınırlar İçerisinde Kalan Blokların Toplam Ekonomik Değeri
Dinamik Prog.	65	22	15	37	15
Hareketli Koni	65	8	7	15	10
Maksimum Akış	65	22	15	37	15
Grafik Teorisi	65	22	15	37	15

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bir açık ocak maden işletmesinin nihai sınırlarını bulabilmek için öncelikle maden yatağı bloklara ayrılır ve blok ekonomik değerleri belirlenir. Blok model üzerinde tercih edilen yöntem uygulanarak nihai sınırlar elde edilir. Blok boyutları seçilirken şev duraylılık çalışmaları sonucu elde edilen genel eğim açısı dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir.

Bu çalışmada, nihai açık işletme sınırını belirlemekte en çok kullanılan 4 yöntem (Dinamik Programlama, Hareketli Koni Yöntemi, Maksimum Akış Algoritması ve Grafik Teorisi) detaylı olarak açıklanmış ve 2 boyutlu bir örnek üzerinde uygulama yapılmıştır. Bu uygulama sonucunda Dinamik Programlama, Maksimum Akış Algoritması ve Grafik Teorisi optimum sonuçları vererek ocak nihai sınırlarını hatasız olarak bulmuşlardır. Hareketli Koni yöntemi ise işleyişinde bulunan hatalardan dolayı maksimum ekonomik ocak değerini elde edememiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ataee-Pour, M., 2000. A heuristic algorithm to optimise stope boundaries, Doctor of Philosophy Thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 319 p.
- Barnes, R.J., 1982. Optimizing the ultimate pit, MS Thesis T-2611, Colorado School of Mines.
- Cai, W.L., 1992. Sensitivity analysis of 3-D model block dimensions in the economic open pit limit design, 23rd APCOM, SME, Colorado, pp. 475-486.
- Carlson, T.R., Erickson, J.D., O’Brain, D.T. and Pana, M.T., 1966. Computer techniques in mine planning, Mining Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 53-56.
- Clark, I., 1979. Does Geostatistics Work?, 16th APCOM, AIME, New York, pp. 213-225.

- Chen, T., 1976. 3D pit design with variable wall slope capabilities. Proceedings 14th APCOM Symposium of the Society of Mining Engineers, AIME, New York, pp. 615–625.
- Crawford, J.T., 1979. Open Pit Limit Analysis – Some Observations on Its Use, 16th APCOM, Crawford and Hustrulid eds., AIME, New York, pp. 625-634.
- Crawford, J.T. and Davey, R.K., 1979. Case Study in Open-Pit Limit Analysis, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, Weiss, A. ed., AIME, New York, pp.310-317.
- Davey, R.K., 1979. Mineral Block Evaluation Criteria, Open Pit Mine Planning and Design, ed. J.T. Crawford and W.A. Hustrulid, SME-AIME, New York, pp 83-97.
- Davey, R.K. and Switzer, J.E., 1979. Computer-Assisted Mineralization Modeling at Kennecott Copper Corporation, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, Weiss, A. ed., AIME, New York, pp. 260-267.
- Dunlop, J.S., 1979. Geostatistical Modelling of an Australian Iron Ore Body, 16th APCOM, AIME, New York, pp. 226-239.
- Elevli, B., 1992. Open pit mine production scheduling using operations research and artificial intelligence, PhD Thesis, Colorado School of Mines, 189 p.
- Erarslan, K., 1996. Development of A Model for Open Pit Limits Optimization Integrated with A Sequencing System, PhD Thesis, ODTÜ, 163 p.
- Ford, C.R. and Fulkerson, D.R., 1956. Maximal flow through a network, Canadian J. Math., Vol. 8, pp. 399-404.
- Hustrulid, W. and Kuchta, M., 2006. Open pit mine planning and design, 2nd edition, Taylor and Francis, London, 735 p.
- Huttagosol, P., 1988. Modified Tree Graph Algorithm for Ultimate Pit Limit Analysis. MS Thesis T-3412. Colorado School of Mines, 396 p.
- Johnson, T.B., 1968. Optimum Open Pit Mine production scheduling, Operations Research Center, University of California, Berkeley, 120 p.
- Johnson, T.B. and Sharp, W.R., 1971. A three-dimensional dynamic programming method for optimal ultimate open-pit design, U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 7553, 25 p.
- Khalokakaie, R., 1999. Computer-Aided Optimal Open Pit Design with Variable Slope Angles, PhD Thesis, University of Leeds.
- Kim, Y.C., 1979. Open Pit Limit Analysis, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, Weiss, A. ed., AIME, New York, pp. 297-303.
- Koenigsberg, E., 1982. The optimum contours of an open pit mine: an application of dynamic programming, Proceedings of the 17th Symposium on the application of computers and operations research in the mineral industries (APCOM), New York: AIME, pp. 247-287.
- Kosovac, M. and Kundu, S., 1978. Iron Ore Co. of Canada's Computerized Analysis Method Speeds Mine Planning and Pit Design, Mining Engineering, July, pp. 767-770.
- Laurent, M., Placet, J. and Sharp, W., 1977. Optimum design of open-pit mines, Gecamines Rapport, No:04/77, Lubumbashi.
- Lemieux, M., 1979. Moving cone optimizing algorithm, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, Weiss, A. ed., AIME, New York, pp. 329-345.
- Lerchs, H. ve Grossmann, I.F., 1965. Optimum Pit Design of Open Pit Mines, CIM Bulletin, Vol. 58, No: 633, pp. 47-54.
- Lipkewich, M.P. and Borgman, L., 1969. Two and three dimensional pit design optimization techniques, A Decade of Digital Computing in the Mineral Industry, AIME, New York, pp. 505–523.
- Lizotte, Y., 1988. The economics of computerized open pit design, Int. J. of Surface Mining, Balkema, pp. 59-78.
- Onur, A.H., 1995. Açık işletmelerde nihai sınır tesbitinde yei bir yöntem: Düzeltilmiş Korobov algoritması, Türkiye 14. Madencilik Kongresi, pp. 269-275.
- Özkan, M., 2006. Açık ocak işletmelerinde optimum nihai sınırın belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 120 p.

- Özkan, M. ve Erçelebi S.G., 2007. Determining Ultimate Pit Limit for Kestelek Boron Open Pit Mine Using Lerchs-Grossmann Algorithm, 33rd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in The Mineral Industry (APCOM), Santiago, Chile, Editor: Eduardo J. Magri, pp. 303-308.
- Pana, M.T., 1965. The simulation approach to open-pit design, 5th APCOM, Tucson Arizona, ZZ-1 to ZZ-24.
- Rychkun, E. and Chen, T., 1979. Open Pit Mine Feasibility Method and Application at Placer Development, Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry, Weiss, A. ed., AIME, New York, pp. 304-309.
- Whittle, J., 1988. Beyond optimization in open-pit design, 1st Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Laval University, Quebec City, March 7-9.
- Wright, E.A., 1987. The use of dynamic programming for open pit mine design: some practical implications, Min.Sci. and Tech., Vol. 6, pp. 79-104.
- Wright, E.A., 1990. Open pit mine design models, Series on mining engineering, Vol. 8., Trans Tech Publications, 187 p.
- Yalçın, E., 1991. Dinamik programlama tekniğindeki gelişmeler. Madencilik Dergisi, Sayı No:4.
- Yalçın, E. ve Saydam, S., 1995. Optimum nihai açık işletme sınırlarını bulan optimizasyon tekniklerinin karşılaştırılması, Türkiye 14. Madencilik Kongresi, pp. 263-268.
- Yegulalp, T.M. and Arias, A.J., 1992. A fast algorithm to solve the ultimate pit limit problem, Proceeding of 23th International APCOM Symposium, pp. 391-397.
- Zhao, Y. and Kim, Y.C., 1990. A new graph theory algorithm for optimal ultimate pit design, SME Annual Meeting, Salt Lake City, UT, preprint No.90-9.
- Zhao, Y. and Kim, Y.C., 1992. A new optimum pit limit design algorithm, 23rd APCOM, SME, Colorado, pp. 423-434.
- <http://www.cse.yorku.ca/~aaw/Wang/MaxFlowStart.htm>