

Açık işletme Dizaynı için Uç Boyutlu Dinamik Programlama Tekniği

A Three Dimensional Dynamic Programming
Technique for Open Pit Design

Ercüment YALÇE\(*)

ÖZET

Bu yazıda, optimum açık işletme sınırlarının bulunması için geliştirilmiş olan üç-boyutlu dinamik programlama tekniği hakkında bilgi verilmektedir. Tekniğin kullanılması sırasında karşılaşılan zorluklar ve önerilen çözüm yolları anlatılmaktadır.

Üç-boyutlu dinamik programlama tekniğiyle ilgili algoritma detaylı olarak anlatılmakta ve sayısal bir örnek verilmektedir.

ABSTRACT

In this paper, a three-dimensional dynamic programming technique is presented for determining the optimum ultimate pit limit. The difficulties encountered during the application of the technique, and suggested solutions are explained.

The algorithm of the three-dimensional dynamic programming technique is explained in detail, and a simple numerical example is given.

(*)Dr. Maden Yük. Müh. Araş. Gör., ODTÜ Maden Müh. Böl., ANKARA

1. GİRİŞ

Geçmişte nihai açık işletme sınırları, cevher yatağından alınan yatay ve dikey kesitler üzerinde elle bulunuyordu. Günümüzde ise bu işlem bilgisayar yardımı ile yapılmaktadır. Özellikle uzun vadeli işletme planlarının fizibilite çalışmaları sırasında, kompütürize edilmiş açık işletme modelleri kullanılmaktadır. Bunun ana nedenlerinden birisi, birçok açık işletme planının çok kısa bir süre içinde hazırlanarak analizlerinin yapılabilmesidir. Diğer bir neden ise, planlama sırasında birden fazla değişkenin aynı anda göz önüne alınarak, optimum nihai sınırın bu değişkenlere göre bulunabilmesidir. Değişkenlerden herhangi birisinde yapılan değişikliğin, optimum nihai açık işletme sınırları üzerine nasıl bir etki yaptığı kolayca görülebilmektedir.

Optimum nihai açık işletme sınırlarının bulunması için değişik optimizasyon teknikleri geliştirilmiştir (Kim, 1978; Koenigsberg, 1982; Ünal ve Yalçın, 1989). Çok kısa sürede ve gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermesinin yanında, basit ve kolay anlaşılır olması nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılan optimizasyon tekniklerinden birisi de dinamik programlama tekniğidir. Diğer optimizasyon tekniklerinde olduğu gibi, bu teknikte de blok modeli kullanılmaktadır. Dinamik programlama tekniği, özellikle uzun ve dar cevher yataklarının optimum açık işletme sınırlarının bulunmasında çok gerçekçi sonuçlar vermektedir.

Johnson ve Sharp (1971) tarafından geliştirilen üç-boyutlu dinamik programlama algoritmasına göre yazılmış olan bilgisayar yazılımının Batı-Kef krom yatağına uygulanması sırasında bazı zorluklarla karşılaşmış ve bu nedenle, algoritmada bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu yazıda, algoritmanın son hali detaylı olarak açıklanmakta ve sayısal bir örnek verilmektedir.

2. DİNAMİK PROGRAMLAMA TEKNİKLERİ

Optimum açık işletme sınırlarının bulabilmek için kullanılan dinamik programlama tekniği, Graf tekniğinin kullanılması ile Lerchs ve Grossman (1965) tarafından geliştirilmiştir. Bu teknik, iki boyutlu dinamik programlama tekniği olup, bir kesit üzerindeki optimum nihai sınırı bulmaktadır. Üç-boyutlu optimum nihai sınırı bulmak için kesitler yan yana getirildiğinde, kesitler arasında uyumsuzluk olmamakta ve rütuş yapmaktır.

gerekmektedir. Bu da elde edilen sınırın, optimum'dan uzak bir sınır olmasına neden olmaktadır (Shenggui ve Starfield, 1985).

Üç-boyutlu dinamik programlama tekniği, Johnson ve Sharp (1971) tarafından geliştirilmiştir. Bu teknik, iki-boyutlu dinamik programlama tekniğinin genişletilmiş hali olup, iki kısımdan meydana gelmektedir. İlk kısımda, enine kesitler üzerindeki her kat için nihai açık işletme sınırı bulunmakta ve her kat için bulunmuş olan sınırlar içinde kalan bloklardan elde edilen toplam net değer, uzunlamasına kesiti oluşturmaktadır. İkinci kısımda ise, iki-boyutlu dinamik programlama tekniği ile uzunlamasına kesit üzerinde optimum nihai sınır elde edilmektedir. Elde edilen optimum nihai sınır üzerinde yapılması gereken rütuş çalışmasının çok az oluşu ve kesitler üzerinde elde edilen nihai sınırların birbirleriyle büyük bir uyum içinde olması, bu tekniği diğer tekniklere göre avantajlı duruma getirmekte ve bu nedenle yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Kim, 1978).

3. BLOK MODELİ VE BLOKLARIN OLUŞTURULMASI

Optimum nihai açık işletme sınırlarının bulunmak için kullanılan optimizasyon tekniklerinin hepsi blok modelini kullanmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan model, üç-boyutlu sabit blok modelidir. Bu blok modelinde cevher yatağı bloklara ayrılmakta ve blokların boyutları, yatağın her noktasında aynı ölçüde alınmaktadır.

Blokları oluşturmak için, cevher yatağının eksenine dik yönde kesitler alınmaktadır. Herbir kesit üzerinde, şev açısı ve basamak yüksekliğine uygun olarak bloklar oluşturulmaktadır. Blok boyutları seçilirken göz önünde bulundurulması gereken faktörler- şunlardır; kullanılan işletme yöntemi, basamak yüksekliği, kullanılan ekipman, yatağın jeolojisi, açık işletme şev açısı, kesitler arası uzaklık vs. Genellikle blok yüksekliği, basamak yüksekliğine eşit alınmaktadır. Blok genişliği, açık işletme şev açısını tutturabilmek için blok yüksekliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Blok boyu ise genellikle kesitler arası uzaklığa eşit olarak alınmaktadır (Johnson, 1970).

Kesitlerde yer alan blokların net parasal değerleri aşağıda verilen genel eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır.

Eğer bloktenörü, sınır tenöründen büyük ise:

$$ND = A.G.T.P_m.P_0 - B.P_0.T - C.T$$

Eğer blok tenörü, sınır tenöründen küçük ise:

$$ND = - C.T$$

Burada, ND= Blok net değeri, TL,

A = Birim konsantre satış fiyatı, TL/ton

G = Blok tenörü, %,

T = Blok tonajı, ton, (T,x DE),

T₁= Blok hacmi, m³

DE= Cevher yoğunluğu, ton/m³

P_m= Cevher kurtarma randımanı, %,

P₀=Konsantre kurtarma randımanı, %,

B = Konsantre zenginleştirme maliyeti, TL/ton,

C = Cevher üretim maliyeti, TL/ton.

Cevher yatağının kesitlere ayrılması ve kesitler üzerinde blokların oluşturulması sırasında göz önünde bulundurulması gereken bazı hususlar vardır. Bunlardan en önemlisi, cevher yatağından alınmış olan kesitler üzerinde oluşturulacak sütun sayısının saptanmasıdır. Kesit üzerinde, yüzeyden başlayarak alt katlara inen optimum açık işletme sınırının tekrar yüzeye çıkabilmesi için, kesitin her iki tarafında bulunması gereken ve cevher içermeyebilen bloklardan oluşan sütun sayısının çok hassas bir şekilde saptanması gerekmektedir. Eğer sütun sayısı gereken sayıdan az olursa, kesitin bir kenarından başlayarak alt katlara inen açık işletme sınırı, kesitin diğer kenarında tekrar yüzeye çıkamayacak ve istenen şev açısı tutturulamayacaktır. Sütun sayısının gereken sayıdan fazla olması durumunda ise toplam blok sayısı, olması gereken blok sayısından çok fazla olacak ve programın çalışması sırasında gerekli olan bellek miktarı ve bilgisayar zamanı gereksiz yere artacaktır. Bunu basit bir örnekle açıklamak gerekirse; 60 kat, 20 kesit ve 80 sütundan oluşan bir cevher yatağının içerdiği blok sayısı 96.000 iken (60x80x20), sütun sayısının 80 yerine 90 alınması durumunda cevher yatağının içerdiği blok sayısı 108.000 olacaktır. Aradaki fark olan 12.000 blok gereksiz yere işleme katılmış olmaktadır. Kesit sayısının saptanması sırasında da aynı durum söz konusu olmaktadır. Programın çalışması sırasında oluşturulan ve cevher yatağının uzunlamasına kesitini temsil eden matriks üzerinde, açık işletme sınırının yüzeyden başlayarak tabana kadar inmesi ve tekrar yüzeye çıkabilmesi için, uzunlamasına kesitin başlangıç ve son kısımlarında da yeterli sayıda sütun yer almalıdır.

4. ÜÇ-BOYUTLU DİNAMİK PROGRAMLAMA ALGORİTMASINDA YAPILAN DEĞİŞİKLİKLER

Johnson ve Sharp (1971) tarafından geliştirilmiş olan algoritmaya göre yazılmış olan bilgisayar yazılımının Batı-Kef krom yatağına uygulanması (Ünal ve Yalçın, 1989) sırasında bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Bu nedenle üç-boyutlu dinamik programlama algoritmasında bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerden ilki, optimum açık işletme sınır konturlarının bulunması işlemine başlama noktasının saptanmasıdır. Johnson ve Sharp'ın algoritmasında sınır bulma işlemine P matriksinin üzerine ilave edilen yapay katın en son sütunundan (P₀, j) başlanmaktadır. Bir sonraki kısımda verilmiş olan algoritmadan da görülebileceği gibi, P matriksi optimum işletilebilir sınırlar içerisindeki toplam net kârı, J ise kesit üzerindeki toplam sütun sayısını ifade etmektedir. Oysa kesit üzerinde topografya yüzey kotunun, kesitin sol kenarından sağ kenarına doğru azaldığı ve cevherli kısmın sağ tarafında kalan sütun sayısının çok fazla olmadığı durumlarda, P₀, j değeri maksimum kâr ifade etmeyebilmektedir. Bu durumda maksimum P değeri, matriksin J sütununun 1. katı ile topografyanın başladığı kat arasındaki herhangi bir katta yer alabilir. Bu, cevher yatağının durumuna göre değişir. Bu nedenle sınır bulma işlemine P₀, j bloku yerine, J+1 sütundaki maksimum P değerine sahip bloktan başlanmaktadır.

Yapılan diğer bir değişiklik de, kesit üzerindeki her kat için optimum nihai sınırın bulunması sırasında açık işletme sınırının daima yeryüzüne ulaşmasını sağlanmış olmasıdır. Yeryüzünün eğimli olduğu ve özellikle ekonomik olmayan kesitler için bulunan açık işletme sınırlarının en alt katının bulunduğu sütun, kesit kenarına çok yakın olmakta, bundan dolayı sınır yeryüzüne ulaşamayabilmekte ve istenilen şev açısı sağlanamamaktadır. Bu durum, yazılıma eklenen kontrol komutlarıyla giderilmiştir.

5. ÜÇ-BOYUTLU DİNAMİK PROGRAMLAMA TEKNİĞİNİN ALGORİTMASI

Üç-boyutlu dinamik programlama tekniği, başlıca şu aşamalardan meydana gelmektedir;

Parametreler:

I = Toplam kat sayısı,

J = Toplam sütun sayısı,

K = Toplam kesit sayısı,

i = Üzerinde çalışılan kat numarası,

j = Üzerinde çalışılan sütun numarası,

k = Üzerinde çalışılan kesit numarası,

m_{ij} = Blok net değeri.

A. Kesit üzerindeki kat konturları:

$k = 0$

1. Aşama:

a. $k = k + 1$

Her i, j için, yani her blok için;

$$M_{ij} = \sum_{q=1}^k m_{qij} \quad i=1,2,\dots,I, \quad j=1,2,\dots,J$$

Burada M_{ij} sütunundaki blokların net değerlerinin, en üstten başlayarak aşağıya doğru ve i katındaki blokun net değeri, m_{ij} de dahil olmak üzere, toplanmasından elde edilen net kârı ifade etmektedir.

b. Kesiti temsil eden matrisin en üst seviyesine bir $i=0$ katı ilave edilir,

$$M_{0j} = 0, \quad j=1,2,\dots,J$$

c. Kesitin başlangıç ve bitiş sütunlarında yeryüzünün başladığı katlar saptanır,

L_1 = Başlangıç sütununda yeryüzünün başladığı kat no,

L_2 = Son sütunda yeryüzünün başladığı kat no.

d. $i=0$

2. Aşama: $i=i+1, j=0$

3. Aşama: Eğer $j=J+1$ ise 7. Aşama'ya git.

a. $j=j+1$

$$b. P_{ij} = M_{ij} + \text{Max}\{P_{i,j+1}, P_{i,j}\}, \quad r=-1,0$$

Burada P_{ij} , optimum işletilebilir sınırlar içerisindeki toplam net karı ifade etmektedir, r ise, sırasıyla -1 ve 0 değerlerini almaktadır.

4. Aşama: $s=0, t=0$

5. Aşama:

$$a. s=s+1, \quad t=t+1$$

$$b. P_{i-s,j+t} = M_{i-s,j+t} + \text{Max}\{P_{i-s+1,j+t}, P_{i-s,j+t+1}\}$$

$$r=-1,0,1$$

c. Eğer $K^i_{j+t} < P_{k,j+t}$ ise 3. aşama'ya git.

$$d. \text{Eğer } K_{s,j+t} > P_{s,j+t} \text{ ise } P_{s,j+t} = K_{s,j+t}$$

6. Aşama: Eğer $i-s=0$ ise 3. aşamaya git, değilse 5. aşamaya git.

7. Aşama:

$$a. P_{\max} = \text{Max}\{P_{q,j+1}\}, \quad q=1,2,\dots,I$$

b. Eğer $P_{\max} < 0,0$ ise, 11. Aşama'ya git.

8. Aşama:

En yüksek değere sahip $P_{q,j+1}$ bloğundan başlayarak kesitin i katı için sınır bloklarını bul.

a. $j=J$

b. Eğer $j=0$ ise 10. aşamaya git.

c. Eğer $i-L_1 > j$ ise $\text{Max}\{P_{q-1,j}\}$, ve 8.e'ye git.

d. $\text{Max}\{P_{q+r,j}\}$, $r=-1,0,1$ için maksimum

P değerine sahip bloku seç.

e. Sınır konturları olan $q+r$ ve $j-1$ değerlerini kaydet.

f. $j=j-1$ ve 8. b'ye git.

9. Aşama: $S_{i-k} = P_{\max}$

Burada S_{i-k} değeri, uzunlamasına kesit üzerindeki k sütununun i katındaki M_{i-k} değerini temsil etmektedir.

10. Aşama: Eğer k ise 2. aşamaya git, değilse 15. aşamaya git.

11. Aşama:

$$a. q=0 \quad R_{0j} = 0,0, \quad j=1,2,\dots,J$$

b. $q=q+1$ Eğer $q>i$ ise 12. aşamaya git.

c. $j=J+1$

d. $j=j-1$ Eğer $j=0$ ise 11. b'ye git.

$$e. R_{qj} = M_{qj} + \text{Max}\{R_{q+r,j+1}\}, \quad r=-1,0$$

Burada R_{ij} , P_{ij} değerinin sağdan hesaplanmış halidir.

f. 11. d'ye git.

12. Aşama:

$$Q_{im} = \text{Max}\{P_{ij} + R_{ij} - M_{ij}\}, \quad j=i-L_1, \dots, J - (i-L_2)$$

Burada Q_{j_m} i katı için minimum zararı veren sınır içinde kalan blok değerlerinin toplamıdır, i katının farklı sütunları için aynı Q değerleri bulunmuş ise, kesit ortasına en yakın olan sütun seçilir ve seçilen kolon numarası m olarak alınır.

13. Aşama:

a- $S_u = Q_{i,m}$

b. Q_{j_m} değeri için sınır bloklarını bul ve i ve j değerlerini kaydet.

14. Aşama:

a. Eğer $i < I$ ise 2. aşama'ya git.
b. Eğer $k < K$ ise 1. a'ya git.

B. Optimum uzunlamasına kesit:

15. Aşama:

a. $i=0, Y_{0,k} = 0,0, k=1,2, \dots, K+1$

b. $i=i+1, k=0$, Eğer $i > I$ ise 16. aşama'ya git.

c. $k=k+1$ Eğer $k > K+1$ ise 15. b'ye git.

d. $Y^S = \{ Y_{i+k} + M \times Y^A \}, r = -1,0,1$

e. 15. c'ye git

16. Aşama:

a. S matrisinin birinci ve sonuncu sütunlarında topografyanın başladığı katları bul.

$L_3 = 1$. sütunda topografyanın başladığı kat no

$L_4 =$ Son sütunda topografyanın başladığı kat no

17. Aşama:

a. $Y^A = \text{Max} \{ Y_{q, k+1} \}, q = 1,2, \dots, L_4 - 1$

b. Eğer $Y_{\text{max}} < 0.0$ ise işlemi durdur. Cevher yatağı ekonomik değil.

18. Aşama:

En yüksek değere sahip $Y_{q, k+1}$ bloğundan başlayarak uzunlamasına kesit için sınır bloklarını bul.

a. $k=K$

b. Eğer $k=0$ ise işlemi durdur.

c. Eğer $I - L_3 > k$ ise $\text{Max} = Y_{M, M}$ ve 18. e'ye git.

d. $\text{Max} \{ Y_{i+r, k} \}, r = -1, 0, 1$ için maksimum

Y değerine sahip bloğu seç.

e. $i+r, k-1$ değerlerini kaydet.

f. $k=k-1$ ve 18. b'ye git.

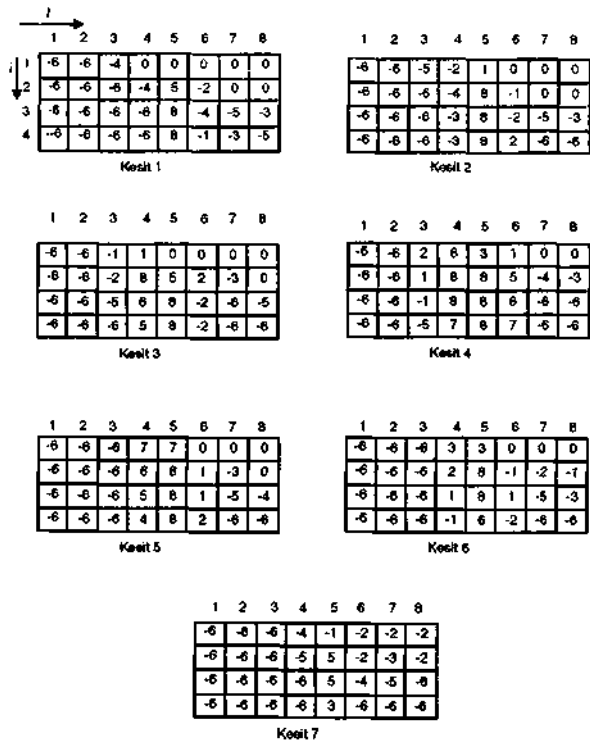
19. Aşama:

Sınır üzerindeki her blok, (i,k), k kesiti üzerinde i katından en az bir blok alacak şekilde bulunmuş olan optimum sınırı temsil etmektedir.

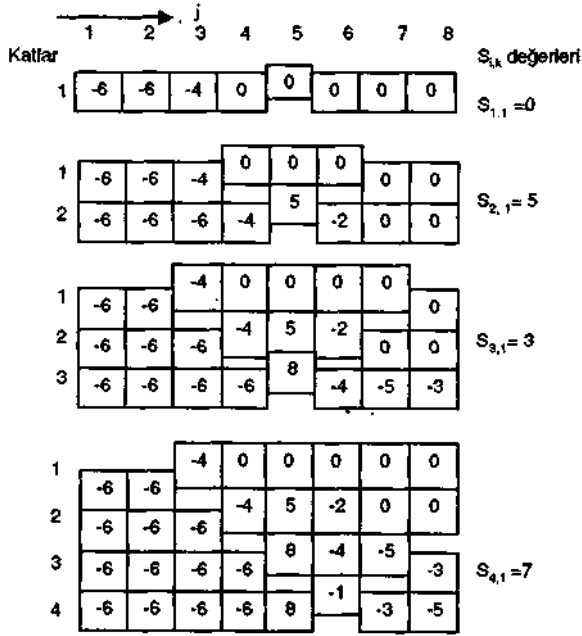
6. SAYISAL UYGULAMA

Üç-boyutlu dinamik programlama tekniği, aşağıda verilen sayısal örnek üzerinde uygulanmış ve anlatılmaya çalışılmıştır. Örnekteki cevher yatağı 7 kesitten meydana gelmektedir. Her kesit üzerinde 8 sütun ve 4 kat bulunmaktadır, Şekil 1. Kesit üzerinde 0 net değere sahip bloklar, hava boşluğunda (atmosferde) yer alan bloklardır.

Cevher yatağı için optimum nihai açık işletme sınırını bulmak amacıyla yapılacak ilk iş, kesitler üzerinde her kat için maksimum kârı veren sınırın bulunması ve sınır içindeki bloklardan elde edilen toplam net değer S_k olarak kaydedilmesidir. Şekil 2'de, 1. kesitin her katı için bulunmuş olan optimum sınırlar ve elde edilen toplam net değerler, S_k , verilmiştir.



Şekil 1. Cevher yatağından alınan enine kesitler ve blok net değerleri



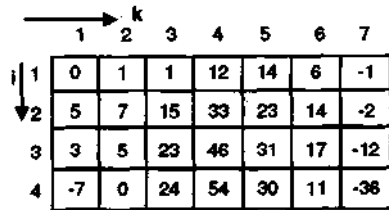
Şekil 2. Kesit bir için optimum kat konturları

Kesit 1'in katları için bulunan optimum nihai sınır blokları ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1- Kesit 1'in Sınır Blokları

| Kat | Sınır Blokları |
|-----|--|
| 1 | 0,5) |
| 2 | (1,4), (2,5), (1,6) |
| 3 | (1,3), (2,4), (3,5), (2,6), (1,7) |
| 4 | (1,3), (2,4), (3,5), (4,6), (3,7), (2,8) |

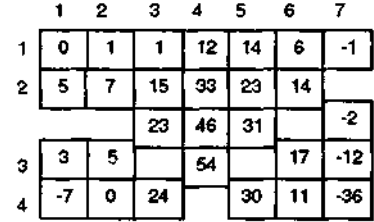
Her kesitten elde edilen S_{ij} değerleri sütunlar halinde yan yana getirildiğinde, iki boyutlu bir matris elde edilir. Bu matris, cevher yatağının uzunlamasına kesitini temsil etmektedir. Şekil 3.



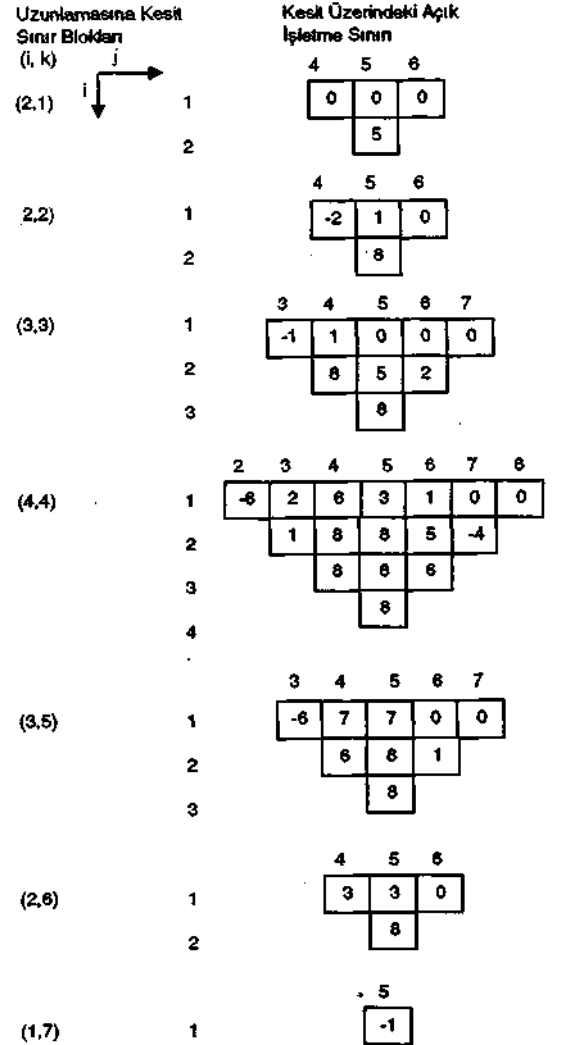
Şekil 3. Optimum uzunlamasına kesit

Algoritmanın 16. aşamasından itibaren, uzunlamasına kesit üzerinde optimum nihai açık işletme sınırları bulunmaktadır. Örnek cevher yatağı için bulunan açık işletme sınırı Şekil 4'de gösterilmiştir. Uzunlamasına kesit için bulunan sınır blokları, (i, k) , k kesitinin i katı için bulunan

optimum sınırı ifade etmektedir. Her kesite karşılık gelen enine kesit sınır konturları yan yana getirilerek cevher yatağı için optimum nihai açık işletme sınırları bulunur. Şekil 5'de, örnek cevher yatağı için bulunmuş olan açık işletme sınırları gösterilmiştir. Cevher yatağından elde edilen toplam net kâr ise 133 birim'dir.



Şekil 4. Uzunlamasına kesit üzerinde bulunan optimum nihai sınır



Şekil 5. Cevher yatağının optimum nihai açık işletme sınırları

6. SONUÇ

Üç boyutlu dinamik programlama tekniği ile bulunan optimum nihai açık işletme sınırları, gerçek değere çok yakın olmakta ve yapılması gereken rütuş çalışması en az düzeye inmektedir. Özellikle ince-uzun damar şeklindeki cevher yataklarında çok iyi sonuçlar vermektedir (Johnson, 1971). Bu durum, tekniğin Batı-Kef krom yatağına uygulanması sırasında da görülmüştür.

Verilen sayısal örnekte şev açısını tutturabilmek için, nihai sınırın en fazla bir blok aşağıya ya da bir blok yukarıya gitmesine izin verilmiştir. Bu nedenle r parametresi, sırasıyla -1,0 ve 1 değerlerini almaktadır. Çok dik şev açıları için blok yüksekliğini çok fazla almak yerine, r parametresinin alacağı değerlerin alt ve üst sınırını genişletmek ve algoritmayı yeni duruma göre yeniden düzenlemek daha kolay bir çözüm yolu olmaktadır ($-n < r < n$). Böylelikle sınır bir sütundan diğerine geçerken, üzerinde bulunulan kata göre n kat yukarıya çıkabilmekte ya da n kat aşağıya inebilmektedir. Ayrıca, cevher yatağının eksenine dik yönde alınan kesit kalınlıklarını ve kesitler üzerinde oluşturulan blok genişliklerini birbirinden farklı almak suretiyle, cevher yatağı için farklı yönlerde farklı şev açıları elde etmek olanaklıdır.

KAYNAKLAR

- JOHNSON, T. B., 1970; "Optimum Design of an Open Pit- An Application in Uranium", Can. Ins. Min. and Met, Special Vol. 12, pp 331-338.
- JOHNSON, T. B. ve SHARP, R.W., 1971; "Three-Dimensional Dynamic Programming Method for Optimal Ultimate Pit Design", US Bureau of Mines, RI 7553.
- KIM, Y.C., 1978; "Ultimate Pit Limit Design Methodologies Using Computer Models- The state of the Art", Min. Eng. Vol. 30, pp 1454-1458.
- KOENIGSBERG, E., 1982, "The Optimum Contours of an Open Pit Mine; An Application of Dynamic Programming", Proc. 17 th APCOM Symp. Soc. Min. Eng., AI-ME, Newyork, pp 274-278.
- LERCH, H. ve GROSSMANN, I. F., 1965; "Optimum Design of Open Pit Mines", Can. Ins. Min. Bui., Vol. 58, pp 47-54.
- SHENGGUI, Z. ve STARFIELD, A. M., 1985; "Dynamic Programming with Colour Graphics Smoothing for Open-pit Design on a Personal Computer", Int. J. of Min. Eng., Vol. 3, pp 27-34.
- ÜNAL, A. ve YALÇIN, E., 1989; "Açık Ocak Nihai Sınırlarının Bilgisayar Destekli Tasarımı ve Batı Kef Krom Yatağına Uygulanması", T, Maden. Bil. ve Tek. 11. Kong., s. 1-19.