

## ACIK OCAK SINIRLARININ ÜRETİM PLANININ BİR FONKSİYONU OLARAK SİMÜLATİF OPTİMİZASYONU

### SIMULATIVE OPTIMIZATION OF OPEN PIT LIMITS AS A FUNCTION OF PRODUCTION SCHEDULING

K. ERARSLAN

Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya

N. ÇELEBİ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

A. G. PAŞAMEHMETOĞLU

Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 06836, Ankara

**ÖZET:** Bu çalışmada, ocak sınırlarını, üretim planlamasının bir fonksiyonu olarak optimize eden bir sistem geliştirmiştir. Kân maksimize eden sistem, ekonomik blok modelini, ocak hacmine bağlı olarak her ocak için ayrı ayrı hesaplayabilmektedir. Ayrıca, saha kazısı, kazıcının hareket kabiliyeti, şev duraylılık şartları, paranın zaman değeri gibi noktalar dikkate alınarak simüle edilmektedir. Sistem, cevher hazırlama tesisinin ihtiyaçlarını göz önüne alarak, tesisin beslenmesini de simüle edebilmektedir. Çıkarılan malzeme siloya gönderilerek tenor ve miktar bilgileri sürekli kaydedilmekte, gerekirse harmanlama da yapılabilmektedir. Sistemde, blok kazı sırasının optimizasyonu için dinamik programlama tekniği kullanılmıştır. Ocağın optimum saha sınırları, en yüksek şimdiki zaman değerinin elde edildiği ocak hacmi ve şekli olarak belirlenebilmektedir. Ayrıca, 3 boyutlu topografya modeli, cevher blok modeli ve nihai ocak modeli gibi görüntüleme imkanları, zamana karşı çeşitli grafik çizimi gibi imkanlar da sunulmaktadır. C++ dilinde kodlanan sistem, gerçek ocak boyutlu, hipotetik veri tabanı üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlarla geçerliliği görülmüştür.

**ABSTRACT:** In this study, a system optimizing open pit limits as a function of production scheduling has been developed. The profit maximization system enables calculation of economic block model regarding particular pit volumes. Besides, excavation is simulated considering movement capability of excavator, slope stability condition and time value of money concepts. The system also simulates feeding of processing plant regarding its requirements. Extracted material is sent to stockpile while keeping quantity and quality records and feed is blended if necessary. Dynamic programming has been used for the optimization of block extraction sequence. Optimal pit boundary is found as pit volume and its shape providing maximum present time value. Additionally, 3 dimensional topographical view, block model, final pit boundary, graphs of various parameters versus time can be visualized. The system, which has been applied to the hypothetical data base having real pit size and its validity

## 1. GİRİŞ

Ocağın sınırları bu ocağı kazı programı, e, boyutu birinci dereceden etkileyen parametrelerdir. 60'lı yıllardan bu yana, bilgisayar ortamında, gerek açık ocak sınırlarının optimizasyonu, gerekse kazı sırasının optimizasyonu ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Esasen birbirleriyle teknik ve ekonomik açıdan bir faaliyet zinciri teşkil eden bu iki konunun, genellikle aynı şekilde incelenildiği görülmektedir. Sınır optimizasyonu çalışmaları, şimdiki zaman değerinin maksimize edildiği ekonomik blok modellerinde, blok

değerlerini sabit kabul etmiş, çıkarıldıkları zamandaki değerlerinin şimdiki zaman karşılığını dikkate almamıştır. Mühendislik ekonomisi açısından böyle bir kabul sınır tespiti için önemli bir hata kaynağı teşkil edebilmektedir. Blok çıkışının optimize edildiği, üretim plan modelleri ise, bu sınırları optimum kabul ederek, optimum olma ihtimali zayıf olan bu sınırlar içinde planlama yapmışlardır. Bunların dışında daha temel bir problem ise, modellerde kullanılan blok değerlerinin doğruluğu ve gerçekliliğidir. Zira, ekonomik değer hesabı sırasında kullanılan birim maliyetler, genellikle başka ocaklara aittir. Bu ise, üzerinde

çalışılan Ökonomik blok modelinin doğruluğu konusunda şüphe doğurmaktadır.

Bu çalışmada, ocak sınırlarını, üretim planlamasının bir fonksiyonu olarak optimize eden, blok değerlerini, üzerinde çalışılacak ocağın hacmine göre hesaplayan, üretim planlamasında, şev açılarını, ekskavatörün hareket kabiliyetini, cevher hazırlama tesisinin istediği malzeme özelliklerini dikkate alan bir sistem geliştirilmiştir. Sistemde, üretim planlaması (blokların çıkarılış sırası) dinamik programlama yöntemiyle sağlanmıştır. Geliştirilen sistem, gerçek ocak boyutlu veri tabanı üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlarla geçerliliği görülmüştür.

## 2. OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

### 2.1 Açık Ocak Sınır Optimizasyonu

Lerchs ve Grossmann'ın, 1965 yılında geliştirdikleri iki yöntem, bilgisayar destekli açık ocak sınır optimizasyonu konusundaki ilk çalışmalardandır. Dinamik Programlama ve Graph Teorisi yöntemlerinin, ekonomik değerleri atanmış blok modeline uygulanması şeklindedir. Graph teorisi (Lerchs ve Grossmann, 1965), maksimum değeri üreten ocak sınırını matematiksel olarak garantileyen bir yöntem olarak günümüze kadar gerek akademik seviyede gerek ticari seviyede kullanılmıştır (Whittle, 1988). Graph teorisine göre daha basit ve bilgisayar ortamında kodlanması daha kolay olan dinamik programlama yönteminin, optimal sınırı tespitinde Graph teorisi kadar başarılı olmadığı görülmektedir. İlk geliştirilen dinamik program algoritması (Lerchs ve Grossmann, 1965), sahayı paralel blok kesitlerine ayırıp optimizasyonu her bir kesit üzerinde yapmaya dayalı olup, kârın maksimize edildiği bu kesit sınırları daha sonra birleştirilerek 3 boyutlu bir modele geçilir. 3. boyuta geçerken kesitler arasında meydana gelen uyumsuzluklar rötuşlarla giderilir. Johnson ve Sharp (1971) ve Koenigsberg (1982), bu problemi çözmeye yönelik 3 boyutlu dinamik programlama algoritmaları geliştirdilerse de, optimizasyon temelde yine 2 boyutlu kesitlere dayanmaktadır. Wright (1987), algoritmayı daha hızlı çalışacak bir tarzda modellemiştir. Dinamik programlama, kolay anlaşılabilirliği ve bilgisayar ortamında kolay kodlanabilirliği nedeniyle, sıklıkla kullanılan ve uygulanan bir yöntem olmuştur.

1965 yılında sınır optimizasyonuna yönelik bir diğer yöntem Pana (1965) tarafından geliştirilen Moving (Floating) Cone, hareketli koniler yöntemi

olmuştur. Yöntem, ocak şevini tasvir eden bir ters koninin, değerli bloklar üzerinde dolaştırılması ve koni içinde kalan blokların ekonomik değer toplamını maksimize etmeye dayalıdır. Gerçek optimum sınırı bulmayı garanti etmeyen yöntemin temel problemini, üst üste keşişme ve her bir komşu blok kombinasyonunun dikkate alınmaması oluşturmaktadır. Lemieux (1979) probleme yönelik bir sezgisel (heuristic) yaklaşım geliştirmiştir. Basit bir yöntem olan hareketli koniler, pek çok araştırmacı tarafından uygulanmıştır (Dağ ve Özer, 1995).

Meyer (1969), Linear (Doğrusal) Programlama yöntemini sınır optimizasyonunda kullanmıştır. Sahayı, blokama veya dikdörtgen prizma şeklinde topuklara ayıran Meyer (1969), kendi ifadesiyle, bu tarz yaklaşımın cevherin bazı kısımlarının terkine veya bir gurup gereksiz blok çıkarılmasına sebebiyet verdiğinden, optimal sonuçtan uzaklaşabilmektedir. Sonradan takip eden bir çalışma çıkmamakla birlikte, yöntem geliştirilebilir bir yapı göstermektedir.

Açık ocak sınır optimizasyonunda en hızlı sonuç gidebilen bir yöntem olarak Maximum Flow (En Fazla Akış) Algoritması görülmektedir. Açık ocaklara, Yegülalp ve Arias (1992) tarafından başarıyla uygulanmıştır. Ekonomik blok modelini bir şebeke yapısında gören yöntemde, kaynak (source) ve sonuç (sink) düğümleri arasında en fazla akış (blok değerleri), Ford ve Fulkerson (1956) ve Ahuja ve Orlin'in (1989) algoritmalarının uyarlanmasıyla sağlanmıştır. Milyonluk blok modellerinin işlenebildiği yöntem, Yegülalp ve ark. tarafından 1993 yılında daha da hızlı çalışacak bir şekle getirilmiştir.

Huttagosol ve Cameron (1992), Transportation (nakliye) algoritmasını sınır optimizasyonunda kullanmıştır. Diğerlerine göre daha yavaş olduğu belirtilen yöntemde, oluşturulan nakliye modeli, simpleks yöntemiyle çözümlenmektedir.

### 2.2. Sınır Optimizasyonu İçin Genel Kritik

Açık ocak sınır optimizasyon tekniklerinin kritiğe açık temel noktaları şöyle sıralanabilir;

- i- Yöntemlerde blok değerleri sabitlenmiş, blokların çıkarılma zamanları dikkate alınmamış, dolayısıyla paranın zaman değeri göz ardı edilmiştir.
- ii- Blok değerlerinin hesaplanmasında, başka ocakların birim maliyet fiyatları kullanılmıştır. Halbuki, bir ocağın birim maliyeti diğeriyle aynı olamayacağı gibi, aynı sahada açılan farklı

ocaklar bile değişik birim maliyetlere sebep olmaktadır,

- iii- Ocak sınırın belirleyen unsurlar içinde üretim planlaması ve cevher hazırlama tesisinin malzeme şartları da etkili olabilmektedir. Geliştirilen optimizasyon modellerinde üretim sırası dikkate alınmadığından, cevher tesisinin sınıra etkisi de göz ardı edilmiştir.

### 2.3. Üretim Planlamasının Optimizasyonu (Blok Çıkarma Sıralaması)

Optimum sınırları tespit edilen ocaktaki blokların, hangi iş planına ve hangi sıraya göre çıkarılırsa maksimum kârı sağladığı veya cevher tesisinin beslenmesinde aranılan miktar ve kaliteden minimum sapıldığı bu başlık altında yapılan çalışmalarda aranmıştır. Blokların çıkarılış sırası, ekonomik değerlerin zaman değeri taşıması nedeniyle rasgele olamaz. Diğer bir deyişle, blokların çıkış zamanlarının farklı olması, ekonomik bakış açısıyla bir mânâ taşır. Bundan dolayı, blok modeli üzerinde bir kazı zaman cetveli oluşturulmaya çalışılmıştır. Böylelikle net şimdiki zaman değerinin maksimum düzeyde olduğu kazı sırası belirlenmiştir (Onur ve Dowd, 1993, Tolwinski ve Underwood, 1992, Eevli, 1992, Chanda ve Wilke, 1992, Dijilani ve Dowd, 1994).

Diğer bir hedef ise tesis ihtiyaçlarının âzami sağlanması ya da, bu hedeflerden en az derecede uzaklaşmaktır. Cevher tesisinin talep ettiği günlük bazdaki malzeme miktar ve kalitesinin sağlanması, işletmenin ömrü boyunca, hedeflerden sapmanın minimize edilmesi amaçlanmakta ve blok kazı sırasını bu kriter belirlemektedir (Mann ve Wilke, 1992, Huang, 1993, Youdi ve ark., 1992, Zhang ve ark., 1993, Chanda ve Dağdelen, 1995, Dowd ve Wilson, 1987).

Üretim planlaması konusunda, yöneylem araştırması tekniklerinin ve sezgisel (heuristic) yaklaşımların kullanıldığı görülmektedir. Chanda ve Wilke (1992), önce parametrik bir yaklaşımla maksimum metal içeren ocak sınırlarını bulmuş, daha sonra doğrusal programlama tekniğiyle tesis besleme optimizasyonunu sağlamışlardır. Ancak, en fazla metal içeren ocağın optimum sınırları vereceği kesin görülmemelidir. Metal dağılımı, derinliği, dekapaj oranı gibi faktörler göz ardı edilmemelidir. Huang (1993), Mann ve Wilke (1992) ve Dijilani ve Dowd (1992) da doğrusal programlama tekniğini optimum blok çıkarma sırasını belirlemede kullanmışlardır. Ortak özellik olarak, bütün çalışmaların önceden belirlenen bir ocak çerçevesi içinde çalışmasıdır.

Youdi ve ark. (1992) ve Zhang ve ark. (1993), hedef (goal) programlama tekniğiyle kömür madenlerinin üretim optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Tesis ihtiyaçlarını, belirtilen şartlardan sapmayı minimize ederek, maksimum düzeyde sağlamayı amaçlamaktadırlar. Hedef (goal) programlama tekniğini metal cevher yatakları için Chanda ve Dağdelen'in (1992) ve fosfat yatakları için Smith ve You'nun (1992) kullandığını görüyoruz. Ocak sınırlarının, bir ön çalışma ile tasarlanıp hazır olarak verildiği kabulüne dayanan çalışmalarda, diğerlerinde olduğu gibi sınır ve üretim optimizasyonu ayrı düşünülmüştür.

Blok kazı sırasının belirlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri de dinamik programlama olmuştur. Bu tekniğin, ardışık kararlar vermeyi gerektiren problemlerde, yapısal yatkınlık taşıdığı görülmektedir (Hillier ve Liebermann, 1995). Onur ve Dowd (1993), kâr maksimizasyonunu amaçlayan başarılı bir çalışma yaptığı görülmektedir. İş makinelerinin çalışacağı gerekli basamak genişliğinin de dikkate alındığı çalışmada, ocak sınırları önceden belirlenmekte ve sıralama işlemi bu sınırlar içinde olmaktadır. Dowd ve Onur (1992), Dowd ve Elvan (1987), Tolwinski ve Underwood (1992) ve Eevli (1992), dinamik programlama tekniğini geliştirerek kullanan diğer araştırmacılardandır.

#### 2.3.1. Üretim Planlaması Çalışmalarına Genel Bir Kritik

Sınır tenörü, blok değeri, ocak sınırı ve üretim planlaması arasında dairesel bir ilişki mevcuttur (Dohm, 1979). Dolayısıyla, genellikle birbirinden bağımsız addedilen sınır ve üretim optimizasyonunun, mümkünse simültane yapılması gerekmektedir. Optimum üretim planlaması konusunda geliştirilen sistemler, belli kabuller altında başarıyla çalışmaktadır. Ancak, en kritize edilebilecek bir kabul olarak, bu sistemlerin optimum olduğu farz edilen, ama, paranın zaman değeri ve tesis ihtiyaçları dikkate alınmadığından gerçek optimum olmayan sınırlar içinde çalışması görülebilir. Özellikle sınır ve sınıra yakın bölgelerde çıkarılan blokların ocağın içinde mi yoksa dışında mı yer alması gerektiği bir bilinmez teşkil etmektedir. Bir diğer önemli nokta ise blok değerlerinin atanmasında ocak sınırlarının ve birim maliyetlerin göz ardı edilmesidir.

#### 2.4. İki. Optimizasyon Konusunu Birleştirme Çalışmaları ve Kritiği

Roman, 1974 yılında bir sezgisel dinamik program ile bahsedilen problemi aşmak istemiştir. Ancak, sistem tabandan bir blok seçimine, sıralamanın tabandan yukarı doğru yapılmasına dayanmaktadır. Blok değerleri ile ocak hacmi arasında bir bağlantı da kurulmamıştır.

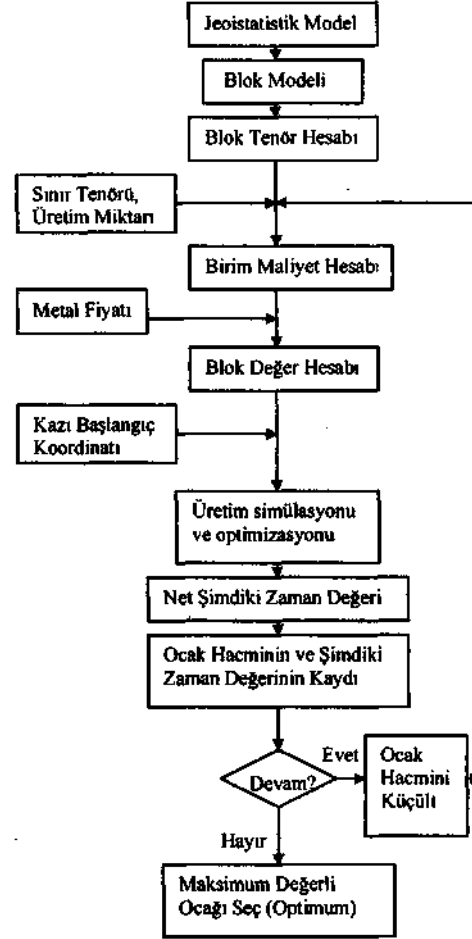
Bu konudaki en başarılı çalışmaların genetik algoritmalarıyla Schofield ve Denby (1992) ve Denby ve Schofield'e (1994) ait olduğunu söylemek mümkündür. Simültane olarak hem blok çıkarılış sırasını hem de ocak sınırlarını optimize edebilmektedirler. Ancak, kurulan sistem, blok değerlerinin ocak sınırlarıyla ilişkisini dikkate almamaktadır.

#### 2.5. Simülatif Ocak Tasarımı

Ocak sınırı ve üretim planı gibi iki hayati konunun en doğru şekilde belirlenmesinin, ocağın en gerçekçi ve detaylı biçimde simülasyonundan geçtiği fikri ağır basmaktadır. Bu sistem bütün ekonomik değerleri ve işletmede yer alacak faaliyetleri birbiriyle bağlantılı görebilmeli ve âdeta ocağı bilgisayar ortamında işletebilmelidir. Bu çalışmada bu hedefe yönelik bir adım atılmış olmakla birlikte, maden işletmesi gibi büyük ve karmaşık bir sistemin tam bir simülasyonu için daha pek çok çalışmanın yapılması gerektiği görülmüştür.

### 3. SIMULATIF OPTİMİZASYON SİSTEMİ

Yukarıda bahsedilen problemleri çözmek amacıyla bir kâr maksimizasyon sistemi geliştirilmiştir (Erarslan, 1996). Sistem üretim planlamasını dinamik programlama tekniğiyle optimize ederken saha sınırlarının da optimum şeklini bulacak bir algoritmaya sahiptir. Birim maliyeti ocak hacminin bir fonksiyonu olan sistem, silodaki malzeme stok bilgisini sürekli tutarak, tesisin istediği miktar ve nitelikte besleme de yapabilmektedir. Ekskavatörün kazısını günlük olarak planlayan sistem, basamak açılarını, bir ekskavatörün hareket kabiliyetini dikkate almakta, ocaktan tesise kadar bir madendeki faaliyetleri simüle etmektedir. Geliştirilen sistemin çalışma şeması Şekil 1 'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Simülatif optimizasyon sisteminin şeması.

Amaç en yüksek net şimdiki zaman değerinin elde edildiği üretim planını (blok çıkarılış sırasını) ve bunun elde edildiği ocak sınırlarını aynı anda bulmaktır. Bu maksatla önce bütün cevherin çıkarılacağı bir ocak sınırı hesaplanır. Sınır içinde kalan hacim aynı zamanda olabilecek en geniş ocak sınırıdır. Bu ocağın birim maliyeti DEKMAL (Paşamehmetoğlu ve ark., 1988) ile hesaplanmıştır. Metal değeri de kullanılarak blokların ekonomik değerleri hesaplanır. Yıllık istenilen üretim miktarı, cevher tesisinin ihtiyaç duyduğu günlük malzeme miktar ve kalitesi, silonun kapasitesi ile ilgili şartlar ve ekskavatörün kazıya başlangıç noktasının sisteme verilmesinden sonra geliştirilen sistem paranın

zaman değerini, şev duraylılığı ile ilgili şartları ve cevher tesisinin koşullarını dikkate alarak ocaktaki blokları çıkarmaktadır. Bütün blokların bitmesiyle, bu hacimli, birim maliyetli ve bu koşullarda çalışan bir ocağın net şimdiki zaman değeri kaydedilir. En büyük ocak sınırlarının belli bir oranda küçültülerek yeni bir ocak hacmi, bağlı olarak yeni birim maliyet hesabı yapıp ve ekonomik blok modeli oluşturulmaktadır. Yeni model üzerinde yine optimum blok çıkarılış sırası ile ocağın işletilmesi simüle edilip yeni bir net şimdiki zaman değeri hesaplanır. Benzeri şekilde ocak hacmi küçültülmeye, kazı si mülasy onuna ve optimizasyonuna devam edilir. Net şimdiki zaman değerinin maksimum olduğu ocak hacmi aynı zamanda optimum sınırları da vermektedir. Bu sınırlar üretim optimizasyonunun bir fonksiyonu olarak, paranın zaman değeri, birim maliyetlerin ocaktan ocağa değişeceği gerçeği, silo şartları ve cevher tesisinin ihtiyaçları da dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Sistem gerekli durumlarda, besleme malzemesini harmanlayarak temin edebilmektedir.

### 3.1. Optimizasyon Sisteminin Matematik Modeli

Net şimdiki zaman değerinin maksimizasyonunu amaçlayan model, dinamik programlama yöntemiyle tasarlanmış bir üretim plan (blok çıkarılış sırası) algoritmasına sahiptir. Sistemin amacı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$PW(\Psi) = \max_{\Psi \in S} (NPV(\Psi, \xi_{i,j,k}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)) \quad (1)$$

burada,

$PW(\Psi)$  =  $\Psi$  hacmindeki maksimum net şimdiki zaman değeri (TL)

$S_{\Psi}$  = hacim seti ( $m^3$ )

$\xi_{i,j,k}$  =  $(i,j,k)$  blok indisi kazı başlangıç noktası

$g_c$  = sınır tenörü, (%)

$g_p$  = tesisin istediği tenor, (%)

$\alpha$  = şev açısı, (°)

$d_r$  = iskonto oranı, (%)

$a^o$  = yıllık üretim miktarı, ( $m^3$ )

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

$s_c$  = silo şartları fonksiyonu,  $s_c = f(r_s, msg_{ij0})$

$r_s$  = silodaki riskli miktarlar

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

$NPV(\Psi, \xi_{i,j,k}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)$ ,  $\Psi$  hacmi için net şimdiki zaman değeridir ve pek çok parametre tarafından kontrol edilmektedir. NPV değeri, dinamik programlama yöntemiyle çıkarılan bloklar tarafından belirlenmektedir.

Blokların çıkarılması optimal bir sıra takip etmektedir. Dinamik programlama kuralları gereği, blok modelde  $n$  tane blok,  $n$  basamağı (stage) oluşturacaktır.  $S(x_{i,j,k})$ , o basamaktaki çözüm (immediate solution) ve  $x_{i,j,k}$ 'lar ise karşılaşılan durumlardır (immediate state). Blok indis değerleri Şekil 2'de gösterilen yönlerde verilmiştir.



Şekil 2. Blok Model İndisleri

Her safhada (stage) bir blok seçilecektir ve her safhada karşılaşılan durumlar (state), seçimine karar verilecek bloklar listesine kaydedilir. Bu bloklar (durumlar) daha sonra şev duraylılığı, tesis ihtiyaçları, net şimdiki zaman değeri gibi testlere tabi tutulacaktır. Ekskavatörün ilk durum kaydı, kazı başlangıç noktasıdır  $\delta_{i,j,k} = x_{i,j,k}$ . Safhadan safhaya geçerken, aralarında bir bilgi transferi olmalıdır. Bu bilgi bloğun daha önce o noktaya gelene kadar getirdiği parasal değerdir. Bu bilgi transfer işlemi, dinamik programlamada, *eklenebilir tip tekrar fonksiyonu* (additive type recursive function) olarak adlandırılan fonksiyonla yapmak mümkündür.

$$f_n(\delta_{i,j,k}) = \max_{p \in S} (P_n(\delta_{i,j,k}, p) + f_{n-1}(R(n, \delta_{i,j,k}, p))) \quad (2)$$

burada,

$f_n(\delta_{i,j,k})$  =  $n$  basamağında (stage) toplam değer (TL)

$\delta_{i,j,k}$  = ekskavatörün pozisyonu,  $(i, j, k)$

$n$  basamağındaki karar olan  $p$ 'yi fonksiyonel olarak gösterirsek;

$$p = f(g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c, \xi_{i,j,k}) \quad (3)$$

$P_n(\delta_{i,j,k}, p(g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c))$ ,  $p$  kararıyla elde edilecek kârı,  $R(n, (\delta_{i,j,k}, p(g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)))$ ,

$n-1$ . basamaktan  $n$ . basamağa aktarılan  $p$  kararını,  $P(g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)$  ifadesi,  $(g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c)$  şartı için verilen kararı göstermektedir.

Ekskavatörün ilk hareket koordinatı olan  $(x_{ijk})$  aynı zamanda hem başlangıç noktası  $(\xi_{ijk}=x_{ijk})$ , hem de ilk durumdur  $(\delta_{ijk}=x_{ijk})$ .  $\delta_{ijk}$  ifadesi işlem ünitesinin (ekskavatörün) hangi blokta olduğunu göstermektedir.

Her bir blok ya boş (hava bloğu), ya dolu (henüz çıkarılmamış) ya da çıkarılmıştır. Bu ihtimaller, aşağıdaki blok durum fonksiyonu ile takip edilir;

$$\partial_{\{i,j,k\}} = \begin{cases} 0 \\ 1 \\ -1 \end{cases} \quad (3)$$

0 kodu, boş (hava) bloğunu, 1 kodu dolu (henüz çıkarılmamış) bloğu ve -1 kodu çıkarılmış bloğu temsil etmektedir. Ekskavatörün etrafındaki bloklar öncelikle, komşu blok listesinin yer aldığı  $N_{jk}$  fonksiyonuna kaydedilir. Bu bloklar mutlaka 1 kodu taşımaktadır.

$$N_{i,j,k} = f(x_{i+\lambda, j+\lambda, k+\epsilon}, \partial_{i+\lambda, j+\lambda, k+\epsilon}) \quad \lambda = -1, 0, 1 \text{ ve } \epsilon = -1, 0, 1 \text{ için} \quad (4)$$

Burada  $\lambda$  ve  $\epsilon$  aynı kat ve bir alt ve üst kattaki blokların kontrol değişkenidirler. Listeye giren her bloğun, şev şartlarından dolayı kazısı mümkün olmayabilir. Kazılabilir nitelikteki bloklar, şev açısına uygunluk testinden sonra aşağıdaki fonksiyonda yer alırlar;

$$m_{i+\lambda, j+\lambda, k+\epsilon} = f(N_{i,j,k}, \partial_{i+\lambda, j+\lambda, k+\epsilon}) \quad \lambda = -1, 0, 1 \text{ ve } \epsilon = -1, 0, 1 \text{ için} \quad (5)$$

Bu liste, ekskavatörün bulunduğu  $\delta_{ijk}$  noktasından gidebileceği blokların yer aldığı ilk daldır. Dinamik programlama tekniği gereği, bu dallardaki her bir blok için de, takip edecek benzeri bir dal yapısı oluşacaktır. Oluşacak dal yapıları  $B_n$  fonksiyonları içinde gösterilmektedir.

$$B_n = f(x_{i,j,k}, b_{i,j,k}, \Phi) \quad (6)$$

$n$ . durumda oluşacak dalda yer alan blokların listesini içeren  $B_n$  listeleri, daha sonraki işlem basamağında, blok çıkarılış sıralarının yer alacağı patikaların oluşturulmasında kullanılacaktır.  $B_n$  listelerinden çıkarılan patikalar  $a_{i,j,k}^o$  ve patikalardaki blokların net şimdiki zaman değerleri  $v_{i,j,k}^o$  fonksiyonunda belirlenmektedir;

$$a_{i,j,k}^o = f(b_{i,j,k}, B_n) \quad (7)$$

$$v_{i,j,k}^o = \sum b_{i,j,k} (1+d_r)^{-\frac{t}{12}} \quad (8)$$

$b_{i,j,k}$  bloğun taşıdığı değer olup,  $d_r$ , yıllık iskonto oranıdır.

Dinamik programlamada karşılaşılan en büyük problem, birbirini takip eden dalların, kısa bir sürede milyarları, hatta  $10^{100}$  leri bulabilmesidir. Bu nedenle, dal katlarının nereye kadar gideceğine karar vererek, dinamik dal oluşumuna bir sınır getirmek gerekmektedir. *Sonlarım kuralı* (termination rule) olarak adlandırılan bu sınırlama, oluşturulan sistemde, sahanın jeostatistik yapısının incelenmesi neticesinde bulunan, etki mesafesi ve buna tekabül eden blok sayısı ( $M$ ) olarak alınmıştır. Dolayısıyla sahanın kazı işlemi,  $M$  sayısından oluşan blok gruplarının tamamlanmasıyla son bulacaktır. Her  $M$  sayısına ulaştıkça, patikalar ve bunların ürettiği değerler incelenip en yüksek kârlı patika seçilecektir.

$$V_{\max}^n = \max_{n \rightarrow M} \{v_{i,j,k}^o(a_{i,j,k}^o)\} \quad (9)$$

$$NPV(\Psi, \xi_{i,j,k}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c) = \sum_{n=1}^M \max_{n \rightarrow M} \{v_{i,j,k}^o(a_{i,j,k}^o)\} \quad (10)$$

dolayısıyla,

$$NPV(\Psi, \xi_{i,j,k}, g_c, g_p, \alpha, d_r, a^o, a^e, s_c) = \sum_{n=1}^M V_{\max}^n \quad (11)$$

olacaktır.

Cevher hazırlama tesisinin istediği miktar ve kalitede malzeme, bir silonun aracılığıyla (regülatör görevi) sağlanmaktadır. Silo, gelen malzemenin; 1- tesisin tenor şartlarına uygun ( $g_p$ ), 2- tenor aralığından daha fazla ( $g_{ap}$ ) ve 3- sınır tenörüyle tesisin istediği tenor aralığında olmasına ( $g_{ap}$ ) göre üç bölge olarak tasarlanmıştır. Sistem, gelen malzemenin bilgisi sürekli olarak kaydederek, silodaki malzeme giriş-çıkışını da simüle etmekte, gerektiği durumlarda malzeme harmanlaması yoluna gitmekte, gerektiğinde maden sahasındaki blok çıkarılışına  $m_{sgyk}$  ve  $s_c$  değişkenleriyle müdahale edebilmektedir.

Sistem, tâyin edilen ocak sınırına ulaşana kadar, blokları çıkarma işlemine devam edecektir. Kazı

işleminin sonunda net şimdiki zaman değeri kaydedilir ve daha küçük hacimli ocak için aynı işlemler tekrarlanır. En yüksek kâr sağlayan ocak aynı zamanda optimum sınırlara ve optimum üretim planına (blok çıkarma sırası) sahip ocak olarak belirlenir.

#### 4. MODELİN UYGULANMASI

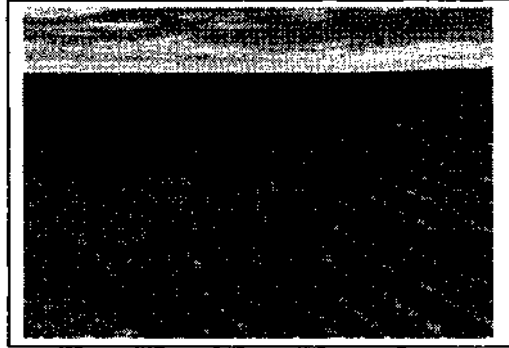
Geliştirilen optimizasyon modeli, C++ dilinde EPDS (Economic Pit Design System) adı altında kodlanmış ve 150x150x40 bloktan oluşan bir hipotetik veri tabanının üzerinde uygulanmıştır. 900.000 bloklu veri tabanı, rasgele değer üreten bir kod sistemiyle oluşturulmuş ve gerçek bir maden sahasının büyüklüğüne uygun, ancak gerçek bir sahadan daha karışık bir blok dağılımına sahip olarak elde edilmiştir. Bloklar 14 metrelik küp şeklinde tasarlanmış ve nihâi şev açısı, her yönde 45° olarak belirlenmiştir. Sınır tenor olarak, % 5, cevher tesisinin talep ettiği tönör aralığı olarak da %7-%8 değerleri kabul edilmiştir. Sistem, belirtilen şev açısı ve sınır tenor şartlarına göre, bütün cevher bloklarını alabilecek en geniş ocak sınırlarını tespit ve rapor etmiştir. Buna göre; sahada 27.356 adet cevher, 547.506 adet değersiz blok bulunmaktadır. Her bir bloğun 2.744 m<sup>3</sup> hacmi olup, toplam değersiz blok hacmi 1.502x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> ve cevher hacmi 75.065x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> olarak rapor edilmektedir. Başlangıç noktası, katların incelenmesi sonucunda, (i=45,j=102,k=2) olarak belirlenmiştir. Yıllık üretim miktarı, 1.650.000 m<sup>3</sup>, 330 gün/yıl mesâi ve 3,5 ton/m<sup>3</sup> yoğunluklu cevher için günlük 5.000 m<sup>3</sup>'tür (17.500 ton/gün). Silo kapasitesi toplam 75.000 m<sup>3</sup> (15 günlük), cevher tesisinin faaliyete geçmesi için stoklarda birikmesi gereken cevher miktarı en az 25.000 m<sup>3</sup> (5 günlük), riskli kabul edilen birikmiş en az cevher miktarı 10.000 m<sup>3</sup> (2 günlük) olarak belirlenmiştir.

Bu şartlar altında en yüksek ocak hacminden %10'luk daraltmalarla elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir. %70 ile %80 arasında yapılan tekrarlarla, en yüksek hacimli ocağın %77'si büyüklüğündeki ocak için maksimum kâr değeri elde edilmektedir. Her ocak hacmi için birim hacim ağırlığı yeniden hesaplanmış, böylelikle ekonomik blok modeli de her ocak hacmi için yeniden oluşturulabilmiştir.

Tablo 1. Optimizasyon Sonuçları.

Ocak Hacmi (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	Hacim Yüzdesi (%)	Dekapaj Birim Maliyeti (TL/m <sup>3</sup> )	Cevher Birim Maliyeti (TL/ton)	Şimdiki Zaman Değeri (10 <sup>12</sup> TL)
1.577	100	124.606	228.402	0.982
1.420	90	129.449	235.784	0.966
1.262	80	125.551	232.563	1.057
1.215	77	126.210	233.337	1.062
1.183	75	127.566	230.012	0.954
1.104	70	129.101	238.404	0.899

Optimal hacme âit değişik malzemelerle kaplanmış ocak modelleri, Şekil 3 ve 4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Optimum ocağın kaplanmış görüntüsü.



Şekil 4. Açık ocağın basamak üstünden görünüşü.

Sistem ayrıca, zamana karşı net şimdiki zaman değeri değişimini, yine zamana karşı silodaki malzeme akışını da grafiksel olarak sağlamaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Açık ocak sınırlarını, üretim planlamasının (blok çıkarılış sırasının) fonksiyonu olarak belirleyen bir kâr maksimizasyon sistemi modeli geliştirilmiştir. Birim maliyetlerinin ocak hacmine bağlı olarak hesaplanabildiği modelde, cevher hazırlama tesislerinin de, gerek üretim planına, gerekse ocak sınırlarına etki etmesi mümkün kılınmıştır. Geliştirilen sistem, bir açık ocaktaki kazı makinasının kazı işlemlerini, çıkarılan malzemenin silolanmasını, cevher hazırlama tesisinin, istenilen nitelik ve miktarda malzemeyle beslenmesini, gerekli durumlarda harmanlama yapılmasını, nihai şev açısını, paranın zaman değerini de dikkate alarak simüle edebilmektedir. C++ dilinde kodlanan model, gerçek ocak boyutlu veri tabanı üzerinde uygulanmış ve mantıklı sonuçlar elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha doğru ve güvenilir optimizasyon sistemlerinin, ocakta geçen bütün faaliyetleri bilgisayar ortamında simüle edebilen sistemler olacağı görülmektedir. Dolayısıyla, bu yüksek maliyetli yatırımın, eri ince ayrıntısına kadar bilgisayar ortamına aktarılması ve animasyonunun yapılabilmesi, hem teknik hem de ekonomik açıdan daha gerçekçi ve başarılı tasarımlar yapılmasını sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Ahuja, R.K. ve Orlin, J., B., 1989., *A Fast and Simple Algorithm for the Maximum Flow Problem*, Operations Research, Cilt 37, No. 5 : 748-759.
- Dohm, G.C., 1979. *Circular Analysis-Open Pit Optimization*, Open Pit Mine Planning and Design, AIME, New York: 282-310.
- Chanda, E.K. ve Dağdelen, K., 1995. *Optimal Blending of Mine Production Using Goal Programming and Interactive Graphics System*, Int. J. of Surface Mining and Reclamation, Balkema: 203-208.
- Chanda, E.K. ve Wilke, F.L., 1992. *An EPD Model of Open Pit Short Term Production Scheduling Optimization for Stratiform Ore Bodies*, 23. APCOM, SME, Colorado: 759-768.
- Dağ, A. ve Özer, Ü., 1995. *Optimum Open Pit Limit of Hekimhan-Deveci Iron Mine: Determination by the Moving Cone Optimising Technique*, Mine Planning and Equipment Selection, Singhal et al. eds., Balkema, Rotterdam: 45-48.
- Denby, B. ve Schofield, D., 1994. *Open-pit Design and Scheduling by Use of Genetic Algorithms*, IMM, Cilt 103: A21-A26.
- Dijilani, M.C. ve Dowd, P.A., 1994. *Optimal Production Scheduling in Open Pit Mines*, Leeds University Mining Association Journal: 133-141.
- Dohm, G.C., 1979. *Circular Analysis-Open Pit Optimization*, Open Pit Mine Planning and Design, Crawford and Hustrulid ed., AIME, New York: 284-310.
- Dowd, P.A. ve Elvan, 1987. *Dynamic Programming Applied to Grade Control in Sub-level Open Stopping*, IMM, Cilt 96: A171-A178.
- Dowd, P.A. ve Onur, A.H., 1992. *Optimising Open Pit Design and Sequencing*, 23. APCOM, SME, Colorado: 411-422.
- Elevli, B., 1992. *Open Pit Mine Production Scheduling Using Operations Research and Artificial Intelligence*, PhD Dissertation, Colorado School of Mines: 189 s.
- Elevli, B., 1995. *Open Pit Mine Design and Extraction Sequencing by Use of OP and AI*, Int. J. of Surface Mining, Reclamation and Environment, Balkema: 149-153.
- Erarslan, K., 1996. *Development of a Model for Open Pit Limits Integrated with a Sequencing System*, PhD Dissertation, Middle East Technical University: 163 s.
- Ford, C.R. ve Fulkerson, D.R., 1956. *Maximal Flow Through a Network*, Canadian J. Math., Cilt 8: 399-404.
- Hillier, F. ve Lieberman, G. 1995. *Dynamic Programming, Introduction to Operations Research*, Chapter 11, McGraw Hill Pub. Co.
- Huang, S., 1993. *Computer-Based Optimization of Open-Pit Mining Sequences*, IMM, Cilt 102: A125-A133.
- Huttagosol, P. ve Cameron, P.C., 1992. *A Computer Design of Ultimate Pit Limit by Using Transportation Algorithm*, 23. APCOM, SME, Colorado: 443-460.
- Johnson, T.B. ve Shjrp, R.W., 1971. *A Tree Dimensional Dynamic Programming Methods for Optimal Ultimate Pit Design*, U.S. Bur. Min., RI 7553.
- Koenigsberg, E., 1982. *The Optimum Contours of an Open Pit Mine: An Application of Dynamic Programming*, 17th APCOM, AIME: 274-287.
- Lemieux, M., 1979. *Moving Cone Optimizing Algorithm, Computer Methods for the 80's*, ed. Weiss, A., SME: 329-345.
- Lerchs, H. ve Grossman, I.F., 1965. *Optimum Design of Open Pit Mines*, CIM Bulletin, Cilt 58, no:633: 47-54.
- Lizotte, Y., 1988. *The Economics of Computerized Open-Pit Design*, Int. J. of Surface Mining, Balkema: 59-78.



- Mann, C. ve Wilke, F.L., 1992. *Open Pit Short Term Mine Planning for Grade Control-A Combination of CAD-Techniques and Linear Programming*, 23. APCOM, SME, Colorado: 487-497.
- Meyer, M., 1969. *Applying Linear Programming to the Design of Ultimate Pit Limits*, Management Science, Cilt 16, No. 2: B121-B135.
- Onur, A.H. ve Dowd, P.A., 1993. *Open-Pit Optimization- Part 2:Production Scheduling and Inclusion of Roadways*, IMM, Cilt 102: A105-A113.
- Pana, M.T., 1965. *The simulation Approach to Open Pit Design*, 5th APCOM, Johannesburg,: 139-144.
- Paşamehmetoğlu, A.G. ve ark., 1988. *TKİ Dekapaj İhale Panoları için Makina Parkı Seçimi, Maliyet Analizi ve Birim Maliyetin (TL/m<sup>3</sup>) Saptanması*, Cilt 1-3, Nihai Rapor, ODTÜ, Maden Müh. Böl. Maden İşletme Anabilim Dalı.
- Roman, R.J., 1974. *The Role of Time Value of Money in Determining an Open Pit Mining Sequence and Pit Limits*, 12. APCOM, Colorado School of Mines, Golden Co.: C77-C85.
- Schofield, D. ve Denby, B., 1992. *Genetic Algorithms: A New Approach to Pit Optimization* 23. APCOM, SME, Colorado: 126-133.
- Smith, M.L. ve You, T., 1995. *Mine Production Scheduling for Optimization of Plant Recovery in Surface Phosphate Operations*, Int. J. of Surface Mining and Reclamation, Balkema: 41-46.
- Tolwinski, B. ve Underwood, R., 1992. *An Algorithm to Estimate the Evolution of an Open Pit Mine*, 23. APCOM, SME, Colorado: 399-409.
- Wang, Q. and Sevim, H., 1992. *Enhanced Production Planning in Open Pit Mining Through Intelligent Dynamic Search*, 23. APCOM, SME, Colorado: 461-471.
- Whinkle, R.F., 1979. *Cost Records of Open Pit Mining*, *Open Pit Mine Planning and Design*, Crawford and Hustrulid ed., SME, New York: 99-126.
- Whittle, J., 1988. *Beyond Optimization in Open-Pit Mining*, Proceedings of the First Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Quebec City, Canada: 331-337.
- Whittle, J., 1989. *The Facts and Fallacies of Open Pit Optimization*, Whittle Programming Pty. Ltd., Report.
- Wright, E.A., 1987. *The use of Dynamic Programming for Open Pit Mine Design: Some Practical Implications*, Min.Sei. and Tech., Cilt 6: 79-104.
- Yegülalp, T.M. ve Arias, J.A., 1992. *A Fast Algorithm to Solve the Ultimate Pit Problem*, 23. APCOM, SME, Colorado: 391-397.
- Yegülalp, T.M., et.al., 1993. *New Developments in Ultimate Pit Limit Problem Solution Methods*, SME Preprint no 93-26, Reno, NV.
- Youdi, Z., Qingxiang, C, Lixin, W. ve Daxian, Z., 1992. *Combined Approach for Surface Mine Short Term Planning Optimization*, 23. APCOM, SME, Colorado: 499-506.
- Yun, Q. ve Zhang, Y., 1987. *Optimization of Stage-Mining in Large Open-Pit Mines*, Proceedings of 13th World Mining Congress, Sweden: 237-244.
- Zhang, Y.D., Cheng, Y.P. ve Su, J., 1993. *Application of Goal Programming in Open Pit Planning*, Int. J. of Surface Mining and Reclamation, Balkema: 41-45.
- Zhao, Y. ve Kim, Y.C., 1992. *A New Optimum Pit Limit Design Algorithm*, 23. APCOM, SME, Colorado: 423-434.

