



Değişken piyasalar için memetik algoritma ile sınır tenörleri eniyilemesi

Optimization of cut-off grades with memetic algorithms for volatile markets

Erhan Çetin^{1*}

¹Dicle Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, erhan@dicle.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0053-6932>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 8 Mayıs 2025
Revizyon 17 Haziran 2025
Kabul 25 Haziran 2025
Online 30 Eylül 2025

Anahtar Kelimeler:

*Değişken piyasa, memetik algoritma
sınır tenörü, eniyileme*

ÖZ

Sınır tenörleri, maden ile yan kayacı ayırmada kullanılan, madencilik ve maden yataklarının değerlendirilmesinin en temel konularındandır. Paranın zaman değerini göz ardı eden ve maden yataklarının alt optimum düzeyde değerlendirilmesine neden olan, statik veya sabit bir sınır tenörünün, bir maden işletmesinde, madenin ömrü boyunca kullanılması şeklindeki geleneksel yöntem, maden yataklarının en ekonomik şekilde değerlendirilmesi önlemektedir. Maksimum net bugünkü değeri elde etmek için, dönemsel azalan bir sınır tenörleri silsilesi elde edilmelidir. Bir madenin ömrü boyunca statik bir sınır tenörü uygulaması yerine, optimum sınır tenörleri silsilesinin belirlenmesi, net bugünkü değeri en üst düzeye çıkaracaktır. Memetik algoritma, evrimsel algoritmalar ile yerel arama yöntemlerini birlikte kullanan ve büyük çaplı problemler için çok sağlam sonuçlar veren bir eniyileme yöntemidir. Madencilik ürünlerinin satış fiyatları dalgalıdır ve gelecekteki değerler bilinemez. Küresel pazarda bir madencilik ürününün satış fiyatındaki dalgalanma, öngörülmesi her ekonomik değerlemeyi geçersiz kılabilir. Ancak, satış fiyatlarının gelecekteki değerleri tahmin edilebilir. Bu makalede, sınır tenörleri eniyilemesi ile ilgili sorunlar açıklanmış, değişken piyasa koşullarında sınır tenörleri eniyilemesinde memetik algoritmanın kullanımı gösterilmiştir. Bu konuda geliştirilen yazılım, değişken piyasa koşulları altında maden yatakları için optimum sınır tenörleri silsilesini bulmaktadır.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 May 2025
Received in revised form 17 June 2025
Accepted 25 June 2025
Available online 30 September 2025

Keywords:

*Volatile market, memetic
algorithms, cut-off grades,
optimization*

ABSTRACT

Cut-off grades are one of the most fundamental issues in mining and mineral deposits appraisal, used to separate ore from host rock. The traditional method of using a static or fixed cut-off grade throughout the life of a mine, which ignores the time value of money and causes sub-optimal valuation of mineral deposits, prevents the most economical valuation of mineral deposits. In order to obtain the maximum net present value, a gradually decreasing cut-off grades sequence should be obtained. Instead of applying a static cut-off grade throughout the life of a mine, determining the optimum cut-off grades sequence will maximize the net present value. Memetic algorithms is an optimization method that uses evolutionary algorithms and local search methods together and provides very robust results for large-scale problems. Sales prices of mining products are volatile and future values are unknown. Fluctuations in the sales price of a mining product in the global market can invalidate every predicted economic valuation. However, future values of sales prices can be estimated. In this article, the problems related to the optimization of cut-off grades are explained and the use of memetic algorithms in the optimization of cut-off grades under volatile market conditions is shown. The software developed in this regard finds the optimum cut-off grades sequence for mineral deposits under volatile market conditions.

Doi: 10.24012/dumf.1695275

* Sorumlu Yazar

Giriş

Sınır tenörü, cevher ve yan kayaç arasındaki sınırları belirlediği için, optimum sınır tenörlerinin belirlenmesi madencilğin temel bir konusudur.

Sınır tenörlerine yönelik geleneksel yaklaşım, gelirin maliyete eşit olduğu kesim tenörünü, dolayısıyla sabit bir tenörü, kullanmaktır. Bu yaklaşım, paranın zaman değerini tamamen göz ardı eder ve genellikle maden kaynağının optimum olmayan bir şekilde değerlendirilmesine yol açar. Paranın zaman değeri, daha yüksek tenörlü bloklar hala mevcutken düşük tenörlü blokları çıkarmanın fırsat maliyetiyle birlikte, maden ömrünün ilk yıllarında daha yüksek sınır tenörlerinde madencilik yapmak ile maden ömrünün sonraki yıllarında daha düşük sınır tenörlerinde madencilik yapmak arasında avantajlı bir takas olmasını sağlar. Bir madencilik operasyonundan elde edilen kâr, uygulanan sınır tenörleri silsilesi ve sonucunda elde edilen cevher tonajlarının doğrudan bir fonksiyonudur. Kâr bu duruma göre değiştiğinden, en yüksek kârı veren bir eniyi sınır tenörleri silsilesi olacaktır. En yaygın kullanılan sınır tenörleri eniyileme kriteri, kârların maksimum net bugünkü değeridir. Net bugünkü değer, bir maden işletmesinde, işletmenin farklı üretim dönemlerinde elde edilen karların, belirlenen bir indirgeme oranı ile indirgenerek, işletmenin başlangıcında toplanması sonucu bulunan parasal ifadedir. Burada uygulanan indirgeme oranı yine paranın zaman değeri kaynaklıdır. Bir maden işletmesinin karlılığının değerlendirildiği yöntemler arasında en sık kullanılan yöntem net bugünkü değer yöntemidir. Net bugünkü değeri maksimize etme hedefi, birim zaman başına kârın maksimize edilmesiyle elde edilir. Bu süreç, operasyonun ilk yıllarında, cevher işleme tesisinin gereksinimlerini karşılamak için yeterli cevher sağlayabilen en yüksek sınır tenörlerinin uygulanmasını gerektirir. Zaman geçtikçe sınır tenörleri düşürülmeli ve böylece fırsat maliyeti düşürülmelidir. Dolayısıyla, en yüksek net bugünkü değer elde edilir. Fırsat maliyeti, paranın zaman değerinden kaynaklanmaktadır. Aynı ederdeki bir miktar para, enflasyonsuz bir ortamda, insanlar tarafından, farklı zamanlarda farklı değerde algılanmakta ve uygulanmaktadır. Önceki bir miktar para, sonraki aynı miktardaki paradan daha değerlidir. Bunun temel sebebi de insan ömrünün sonlu olmasıdır. Reel faizin sebebi de paranın bu zaman değeridir. Fırsat maliyeti ise, işletmenin ilk yıllarında, yüksek bir gelir, sonraki yıllarda daha düşük gelirle çalışmayı gerektirir. Bu da işletmenin işl yıllarında yüksek, sonraki yıllarında ise düşük sınır tenörleri uygulamasını, yani optimum sınır tenörlerini gerektirir. Sınır tenörleri eniyilemesinde, işletmenin ömrü boyunca hep aynı sınır tenörü ile çalışmak, işletmenin ilk yıllarında daha yüksek sınır tenörleri ile sonraki yıllarda ise azalarak değişen sınır tenörleri ile çalışmaya nazaran bir fırsat maliyeti oluşturmaktadır.

Ancak, işletme ömrü boyunca sabit bir sınır tenörü ile çalışmak yerine, optimum sınır tenörleri ile çalışmak, daha yüksek indirgenmiş kar elde edilmesini sağlar iken, işletme ömrünü kısaltmaktadır. Bunun sebebi, işletmenin ilk yıllarında yüksek sınır tenörlerinin uygulanması sonucunda, bir miktar orta seviyede ortalama tenöre sahip blokların, o yıllara has olarak, cevher olarak kabul edilmemesidir.

Bir sınır tenörü eniyilemesi işlemi için girdiler arasında, bir maden ürününün satış fiyatı en değişken olanıdır. Küresel pazarda bir madencilik ürününün satış fiyatındaki güçlü bir değişiklik, her türlü ekonomik değerlemeyi uygulanamaz hale getirebilir. Optimum sınır tenörleri silsilesini bulmadan en fazla geliri elde etmek mümkün olmadığından, kullanılacak sınır tenörlerini bulmak için algoritmaya bir madencilik ürününün değişken satış fiyatları eklenmelidir.

Bu makalenin amacı, memetik algoritmalar aracılığıyla maden yatakları için sınır tenörlerinin optimal silsilelerini belirlemek için genel yöntemler geliştirmek ve bu yöntemi bilgisayar programlarında uygulamaktır. Bu amaçla geliştirilen bilgisayar programı, maden yatakları için optimum sınır tenörleri silsilesini belirleme yeteneğine sahiptir. Bu çalışmanın özgünlüğü, cevher satış fiyatlarının değişkenliği dikkate alınarak satış fiyatının algoritmaya stokastik olarak eklendiği ve memetik algoritma yönteminin uygulandığı ilk çalışma olmasıdır.

Sınır Tenörleri Eniyilemesi

Sınır tenörleri madencilikte, iki eylemi ayırmada kullanılır. Çıkarılacak madenin mineral içeriği belirlenen sınır tenörünün üzerindeyse, cevher olarak sınıflandırılır ve belli bir kârla çıkarılabilir. Aksi takdirde, yan kayaç olarak sınıflandırılır ve kullanılan madencilik yöntemine bağlı olarak atık sahalarına gönderilir veya yerinde bırakılır.

Lane [1],[2], optimum sınır tenörleri teorisinin öncüsü olarak kabul edilmelidir. Kapsamlı bir ekonomik teori ve optimum sınır tenörlerini belirlemek için bir algoritma sağlamıştır. Çalışma, bir madencilik operasyonunu üç ana aşamaya ayırmaya dayanmaktadır: madencilik, mineral işleme ve rafinasyon ve/veya pazarlama. Sınır tenörleri, bu aşamaların her bir çifti arasındaki çeşitli sınırlamalara bağlıdır.

Lane'in birim başına net bugünkü değer için temel ifadesi aşağıdadır:

$$v = (p - k) * x * y * a - x * h - m - (f + F) * t \quad (1)$$

burada;

v: net bugünkü değer,

p: pazarlanan ürün birimi başına fiyat,

k: pazarlama değişken maliyeti,

x: cevher/malzeme oranı,

y: cevher işleme verimi,

a: ortalama tenör,

h: cevher işleme değişken maliyeti,

m: madencilik değişken maliyeti,

f: sabit maliyet,

F: fırsat maliyeti,

t: birim başına zaman.

Formüle fırsat maliyetinin dahil edilmesi, azalarak değişen sınır tenörleri silsilesini garanti eder.

Cetin and Dowd [3], polimetallik yataklarda sınır tenörleri eniyilemesinde genetik algoritma yöntemini uygulamışlardır. Asad [4] ve Asad and Topal [5] maliyetler ve metal fiyatlarında olası artışlar ve döküm sahasındaki bir

kısım malzemenin sonraki yıllarda düşen sınır tenörleri çerçevesinde yeniden değerlendirilmesi doğrultusunda sınır tenörleri eniyilemesi çalışmışlar, Gholamnejad [6, 7] sınır tenörleri eniyilemesi teorisine rehabilitasyon maliyetini eklemiştir. Azmi et al. [8] sınır tenörleri eniyilemesinde kullanılan indirgenmiş karın yanında gerçek opsiyonlar yöntemini de kullanmışlardır. Çetin [9] satış fiyatını algoritmaya stokastik olarak ekleyerek genetik algoritma ile optimum sonuca varmıştır.

Memetik Algoritma ile Eniyileme

Memetik algoritmalar evrimsel algoritmalar sınıfında değerlendirilir. Evrimsel algoritmalar 1970'lerden bu yana uzun bir yol kat etmiştir. Kökenleri Holland'a [10] kadar uzanır. Memetik algoritmalar, biyolojik ve kültürel evrimleri birleştiren bir kombinasyonel arama motorudur. Memetik Algoritmaların temel felsefesi Richard Dawkins'in [11] kavramına dayanmaktadır. Dawkins'ten alıntı: "Mem örnekleri melodiler, fikirler, sloganlar, giyim modaları, çanak çömlek veya kemer inşa etme yollarıdır. Genler, spermiler veya yumurtalar aracılığıyla vücuttan vücuda sıçrayarak gen havuzunda kendilerini yaydıkları gibi, memler de geniş anlamda taklit olarak adlandırılacak bir süreçle beyinden beyne sıçrayarak kendilerini mem havuzunda yayarlar." Ayrıca, 'memetik' sıfatı Richard Dawkins tarafından türetilen 'mem' teriminden gelir.

Memetik algoritmalar, popülasyona dayalı genel bir yöntem ile her bir birey tarafından yapılan yerel bir arama arasındaki bir evlilik olarak görülebilir (Garg [12]).

Bu çalışmada kullanılan yerel arama, optimumun mevcut durum ile komşu yılların sınır tenörleri arasında yattığı varsayımına dayanan yerel bir iyileştirme amaçlı sezgisel yöntemdir. Genetik algoritmalar tarafından üretilen en iyi çözümleri ince ayarlamak (veya odaklamak) için kullanılır. Memetik algoritmanın genetik algoritmadan temel farkı olan yerel arama ile, genetik algoritmadan elde edilen optimum sonuçlar, değişikliklere uğratılarak, yeniden değerlendirilir. Genetik algoritma sonuçlarından daha iyi değerlere ulaşılır ise, yeni sınır tenörleri silsilesi kabul edilir. Ulaşılmaz ise, genetik algoritma sonucu elde edilen optimum yapı kabul edilir. Bu yüzden, memetik algoritmadan elde edilen sonucun genetik algoritmadan elde edilen sonuçtan kötü olması mümkün değildir. Ancak, tersi mümkündür.

Memetik algoritmalar, özellikle büyük ölçekli optimizasyon problemlerinin çözümüne uygun evrimsel algoritmalarlardır. Olasılıksal algoritmalar sınıfına aittirler ancak yönlendirilmiş ve stokastik aramaları birleştirdikleri için rastgele algoritmalarından çok farklıdır. Evrimsel arama yöntemlerinin bir diğer önemli özelliği, olası çözümlerden oluşan bir popülasyonu sürdürmeleridir. Memetik algoritmalar ayrıca genetik operatörleri kullanarak yerel optimumlardan kolayca kaçabilirler.

Memetik algoritmada her bir kromozom (ya da birey) bir sınır tenörleri silsilesini içeren genlerden oluşur, Her bir gen ise bitlerden oluşur. Her bir bit ise, kromozomdaki genlerin bir hanesini temsil eder. Bir memetik algoritma uygulamasında, her bir jenerasyon (ya da nesil) için araştırılan çözüm kümesine ya da kromozom sayısına popülasyon (ya da nüfus) denir. Her bir yeni jenerasyon için, popülasyon içerisinde rastgele seçilen her bir çift kromozom, ebeveynler olarak çaprazlamaya (eşleşme) tabi tutulur. Ayrıca, rastgele seçilen bazı kromozomlar mutasyona tabi tutulurlar.

Memetik algoritmada seçilen popülasyon ve jenerasyon sayısı parametreleri ne kadar yüksek seçilir ise, sonucu iyileştirme olasılığı artabilir, ancak programın çalışma süresini çok uzatabileceğinden, optimum bir düzeyde tutulmalıdır. Çaprazlama oranı ve mutasyon oranı parametrelerinin çok yüksek alınması arama alanını genişletip yerel optimumlardan kaçılmasını sağlayabilir ancak, mevcut iyi bölgelerden uzaklaşma riskini de barındırdığı için optimum bir düzeyde tutulmalıdır.

Memetik algoritmalar için geliştirilen bilgisayar programının akış şeması ve algoritma adımları aşağıdaki gibidir:

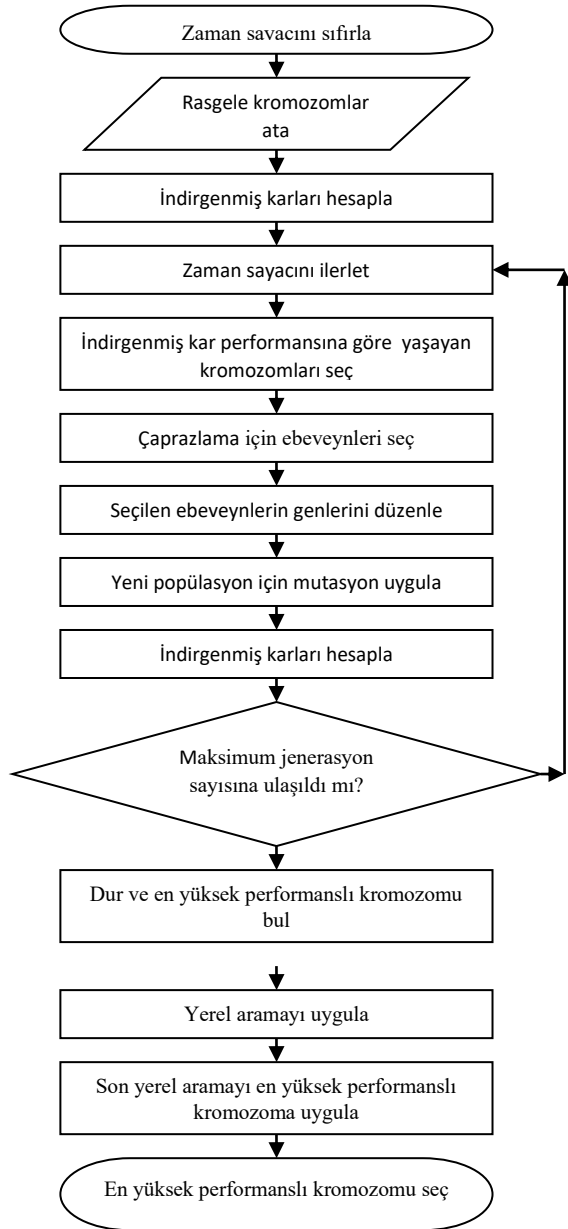


Figure 1. Memetik algoritma akış şeması

1. Çözüm alanını kodlama. İkili bitler kullanarak çözümleri aramak için kromozomları kodlama.
2. Popülasyon sayısını (kromozomlar) ve jenerasyon boyutunu ayarlama. Çaprazlama ve mutasyon oranlarını ayarlama.
3. Popülasyonu başlatma.
4. Genetik Algoritmaları uygulama.
5. Yerel aramayı uygulama.
6. Son yerel aramayı en uygun kişiye (kromozom) uygulama.

Değişken Piyasalar

Bir sınır tenörleri eniyilemesi işlemi için kullanılan girdiler arasında, bir maden ürününün satış fiyatı en değişken olanıdır. Küresel pazarda bir madencilik ürününün satış fiyatındaki herhangi bir değişiklik, tüm ekonomik

değerlendirmeleri geçersiz kılabilir. Temel olarak, kimse fiyatların gelecekte nasıl değişeceğini bilemez, ancak tahmin edilebilir. Tüm hassasiyet ve risk analizleri, girişimcileri tahmini riskler konusunda bilgilendirmek için yapılır. Ancak, risk faktörü girişimcilere bir madencilik kuruluşunun riskleri hakkında bir fikir vermesine rağmen, optimumluk hesaplamalarını etkilemez.

Duyarlılık ve risk analizleri girişimcilikte karar alma için iyi araçlar olsa da, stokastik olarak tahmin edilen değişken piyasa koşulları için optimum sınır tenörü politikasına dair hiçbir ipucu vermezler. Daha iyi bir madencilik planı yapmak için, yıllık dinamik sınır tenörü problemini optimum şekilde çözmek gerekir ve bu da değişken piyasa koşullarını dikkate almayı gerektirir. Bu, bir projeyi kabul etme veya reddetme kararı vermekle ilgili değildir. Ancak mümkün olduğunca doğru bir şekilde optimum sınır tenörlerini bulmakla ilgilidir. Bu nedenle, bu çalışmada, bir madencilik ürününün değişken satış fiyatlarının, kullanılacak sınır tenörlerini bulma algoritmasına eklenmesi gerektiği kabul edilmektedir. Optimum sınır tenörleri silsilesi bulunmadan, en fazla geliri bulmak mümkün değildir. Bir emtianın bugünkü satış fiyatını, bunun tahmini gelecekteki değerleri yerine kullanmak, en iyi net bugünkü değerden fedakarlık yapmak anlamına gelebilir.

Geleceği tahmin etmek için geçmiş uygulamak gerekir. Geçmiş piyasa fiyatları, gelecekteki fiyat tahminleri için kimlik sağlar. Tahminler, doğası gereği, deterministik veya stokastik olabilir. Ayrıca, geleceği tahminde bulunurken, önceki yıllardan ziyade yakın yıllara daha fazla ağırlık verilmesi gerekmektedir.

Değişken Piyasalar İçin Sınır Tenörleri Eniyilemesine Memetik Algoritmanın Uygulanması

Bir sınır tenörleri eniyilemesi probleminin çözüm kümesi içerisinde, global optimum noktadan ve birbirlerinden oldukça uzakta olan çok sayıda yerel optimum nokta vardır. Stokastik arama yöntemleri, bu tür problemler için küresel optimum noktayı bulmada kolayca başarısız olabilir. Bu tür problemlerdeki gerçek zorluk, sınırlı bir süre içinde küresel optimum noktaya yakın çözümler bulmaktır. Memetik algoritmalar, bu bağlamda mevcut diğer birçok arama yönteminden daha güçlüdür.

Sınır tenörleri eniyilemesine memetik algoritmaların uygulanması için bu çalışmada kullanılan kodlama ve değerlendirme süreçleri aşağıda açıklanmıştır:

Kodlama

Bir cevher yatağında bir sınır tenörü değeri için bir bireyin kodlanması basit bir işlemdir. İkilik sistem kullanılırsa, bir dizinin uzunluğu fazla olacaktır. 5 bitlik bir dize, $2^5 = 32$ sınır tenörünü temsil edebilir. İkilik koddan gerçek değerleri üretmek (yani, dizeyi onluk sisteme çevirmek) için formül şudur:

$$X = X_{\min} + \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^L - 1} * Y \quad (2)$$

burada;

X: Eşleme değeri,

$X_{\min}$: Aranacak minimum sınır tenörü,

$X_{\max}$: Aranacak maksimum sınır tenörü,

L: İkili dizinin uzunluğu,

Y: İkili gösterimin değeri.

5 bitlik bir dize için ikili gösterimin değeri, 00000 dizesi için 0 ile 11111 dizesi için 31 arasında bir tam sayı olacaktır.

Optimum sınır tenörleri probleminin çözümüne memetik algoritmaların uygulanması, dizinin uzunluğunda önemli bir artış gerektirir. Maden ömründeki her yılda farklı bir optimum sınır tenörü olabileceğinden, aynı dizide farklı genler olmalıdır. Maden ömrü 20 yıl ise, dizi her biri 5 bit uzunluğunda olan 20 genden oluşacaktır ve kromozomun toplam uzunluğu 100 bit olacaktır.

Değerlendirme

Memetik algoritmalar, her bireye, performansına bağlı olarak, bir uygunluk değeri atanır. Sınır tenörleri eniyilemesinde amaç fonksiyonu, maksimum net bugünkü değerdir. İndirgenmiş kâr ne kadar yüksekse, birey o kadar iyidir.

Bu çalışmadan ve başkaları tarafından yapılan çalışmalardan (Lane [1], [2], Asad [4], Dowd[13], Cetin and Dowd [3], Cetin [14], Cetin and Dalgic [15]), maksimum net bugünkü değerin yalnızca azalan bir sınır tenörleri politikasıyla elde edilebileceği çok açıktır. Yani, madencilik operasyonu madenin ömrü boyunca kademeli olarak azalan nispeten yüksek bir sınır tenörüyle başlamalıdır. Bu nedenle ve hesaplamaların hızını artırmak için, azalarak değişenler dışındaki tüm sınır tenörleri silsilelerine sahip olan bireylersistemde ortadan kaldırılır.

Bu çalışmada kullanılan yerel arama, doğası gereği deterministiktir. Yani, program tüm olası değerleri tek tek arar. Hayatta kalan tüm kromozomların (popülasyon) ve en iyi kromozomun dizelerindeki tüm sınır tenörleri değiştirilir.

Satış fiyatı algoritmaya stokastik olarak eklenir. Algoritmaya satış fiyatlarını eklemek için üstel artımlar kullanılır. Her artışın algoritmada eşit ağırlığı vardır. Daha sonra, tahmini değeri seçmek için Monte Carlo Simülasyonu gerçekleştirilir. Algoritmaya eklenecek toplam artımlı yıl sayısı aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$Y = \sum_{k=0}^n 2^k \quad (3)$$

burada;

Y : dahil edilecek geçmiş yılların sayısı.

n : artım sayısı.

2^0 : bu yılın fiyatı.

Satış fiyatlarını sürece eklerken alınacak bir güvenlik önlemi, nominal fiyatlar yerine gerçek fiyatların kullanılmasıdır. Kullanılan paranın enflasyonunun etkisi açıkça ortadan kaldırılmalıdır.

Son olarak, simüle edilmiş satış fiyatlarının ortalama değeri algoritmaya eklenir. Algoritmaya stokastik fiyatların eklenmesinden sonra, Lane(1964)'in sınır tenörleri için denklemi şu hale gelir:

$$v = (\mu_{\delta} - k) * x * y * a - x * h - m - (f + F) * t \quad (4)$$

burada;

v : net bugünkü değer,

δ : pazarlanan ürün birimi başına stokastik satış fiyatı,

μ_{δ} : pazarlanan ürün birimi başına stokastik satış fiyatlarının ortalaması,

p: pazarlanan ürün birimi başına fiyat,

k: pazarlama değişken maliyeti,

x: cevher/malzeme oranı,

y: cevher işleme verimi,

a: ortalama tenör,

h: cevher işleme değişken maliyeti,

m: maden işletme değişken maliyeti,

f: sabit maliyet,

F: fırsat maliyeti,

t: birim başına zaman.

Örnek Çalışma

Memetik algoritmalar aracılığıyla optimum sınır tenörlerini belirlemek için geliştirilen yazılımın uygulamasını göstermek amacıyla buraya bir örnek uygulama eklenmiştir. Söz konusu olan bir bakır yatağıdır. Teknik ve ekonomik veriler Tablo1 ve Tablo2'de gösterilmiştir.

Bu konu için geliştirilen bilgisayar programı C++ kodlarıyla yazılmıştır. Program 13 CPU saniyesinde sonlanmaktadır. Sonuçlar Tablo3'de verilmiştir.

Tablo 1. Bakır yatağı için tenör-tonaj tablosu.

Grade (%)	Tonnage
0.0-0.3	1.2
0.3-0.4	6.3
0.4-0.5	13.1
0.5-0.6	20.4
0.6-0.7	22.2
0.7-0.8	24.9
0.7-0.8	23.1
0.8-0.9	21.5
0.9-1.0	20.4
1.0-1.1	19.6
1.1-1.2	17.1
1.2-1.3	13.7
1.3-1.4	10.2
1.4-1.5	9.3
1.5-1.6	7.2
1.6-1.7	5.1
1.7-1.8	3.0
1.8-1.9	2.4
1.9-2.0	1.1
2.1-2.2	0.5
2.2-2.3	0.2

Tablo 2. Memetik algoritma için ekonomik ve teknik veri.

Tanım	Değer
Sınır tenörleri alt limiti	0.3
Sınır tenörleri üst limiti	1.23
İşletme kapasitesi (ton/yıl)	13,000,000
İşleme kapasitesi (ton/yıl)	10,000,000

Rafineri kapasitesi (ton/yıl)	100,000
Satış fiyatı (\$/ton)	8,193
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	10,139
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	8,217
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	9,377
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	10,162
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	5,240
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	6,018
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	6,825
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	5,600
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	4,695
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	6,295
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	6,891
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	7,249
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	7,956
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	8,960
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	6,838
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	4,569
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	8,383
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	7,681
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	8,046
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	3,249
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	2,734
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,648
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,596
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,682
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,786
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,511
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	1,733
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	2,514
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	2,658
Önceki yıl satış fiyatı(\$/ton)	2,773
Rafineri gideri (\$/ton)	2200
Cevher kazanım oranı (%)	92
Birim işletme gideri(\$/ton)	3.5
Birim işleme gideri(\$/ton)	13.3
Sabit maliyet (\$/yıl)	3,500,000
İndirgeme oranı (%)	10
Popülasyon sayısı	1000
Jenerasyon sayısı	1000
Çaprazlama oranı	50
Mutasyon oranı	60

Tablo 3. Sonuçlar. (Toplam indirgenmiş kar 3,019.76M\$)

Yıl	Sınır Tenörü (%)	Ortalama tenör (%)	Tükenme hızı (Mt)	Üretim hızı (Mt)	Rafineri hızı (1000 ton)	Yıllık Kar (M\$)
1	0.66	1.13	14.88	11.54	120.00	378.80
2	0.63	1.11	14.58	11.72	120.00	377.55
3	0.63	1.11	14.58	11.72	120.00	377.55
4	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
5	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
6	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
7	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
8	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
9	0.60	1.10	14.31	11.89	120.00	376.15
10	0.57	1.08	14.02	12.00	119.43	372.94
11	0.54	1.07	13.61	12.00	117.76	366.18
12	0.48	1.04	13.00	12.00	114.83	354.09
13	0.48	1.04	13.00	12.00	114.83	354.09
14	0.45	1.03	12.74	12.00	113.73	349.52
15	0.42	1.02	12.52	12.00	112.62	344.83

16	0.39	1.01	12.35	12.00	111.69	340.86
17	0.36	1.01	12.25	12.00	111.13	338.46
18	0.30	1.00	9.18	9.13	83.68	253.71

Tablo 3’de görüldüğü gibi, sınır tenörleri ve tükenme hızları azalarak değişmektedir. Sınır tenörleri %0,66’dan başlamakta ve kademeli olarak %0,30’a düşmektedir. Memetik algoritma, çaprazlama ve mutasyon araçları vasıtasıyla yerel bir optimum noktadan kolayca kaçabildiği, doğal seçim ortamı ve algoritmanın stokastik kısmından gelen optimum verilerin yerel bir arama vasıtasıyla yeniden değerlendirildiği için çok güçlü bir eniyileme aracıdır.

Sonuçlar

Bu araştırmadan da anlaşılabileceği gibi, maksimum net bugünkü değer ancak azalarak değişen bir sınır tenörleri politikasıyla elde edilebileceği çok açıktır. Yani, madencilik operasyonu, madenin ömrü boyunca kademeli olarak azalan nispeten yüksek bir sınır tenörü değeriyle başlamalıdır.

Sınır tenörleri eniyilemesinde evrimsel algoritmaların kullanımı son yıllarda popülerlik kazanmaktadır. Memetik algoritmalar yöntemi çok güçlü bir arama motorudur. Yöntemin çaprazlama, mutasyon ve doğal seçim davranışı, yerel bir optimum noktadan kaçmasını sağlar. Ve takip eden yerel arama, stokastik işlemler sonucu elde edilen optimumu daha da iyileştirir.

Örnek çalışmadan elde edilen sonuç, evrimsel algoritmaların optimum sınır tenörlerini aramada çok yararlı olduğunu göstermektedir.

Piyasa fiyatları belirsiz olduğundan, tahmin edilmeleri gerekir. Bunu yapmamak ve madencilik ürünlerinin güncel satış fiyatlarını kullanmak maden yataklarının verimsiz değerlendirilmelerine yol açabilir. Bu nedenle, maden değerlendirmesi yapılmadan önce satış fiyatları geleceğe yönelik olarak tahmin edilmelidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] K. F. Lane, “Choosing the optimum cutoff grade,” *Colorado School of Mines quarterly*, vol. 59, no. 4, pp. 811-829, 1964.
- [2] K. F. Lane, *The Economic Definition of Ore*, Mining Journals Books Ltd., London, UK, 1988.
- [3] E. Cetin and P. A. Dowd, “The use of genetic algorithms for multiple cut-off grade optimization,” in *Proc. 30th Int. Symp. APCOM*, Littleton, Colorado, USA, Apr. 11-13, 2002.
- [4] M. W. A. Asad, “Optimum cut-off grade policy for open pit mining operations through net present value algorithm considering metal price and cost escalation,” *Engineering Computations*, vol. 24, no. 7, pp. 723-736, 2007.

- [5] M. W. A. Asad and E. Topal, "Net present value maximization model for optimum cut-off grade policy of open pit mining operations," *Journal of the SAIMM*, vol. 111, no. 11, pp. 741–750, 2011.
- [6] J. Gholamnejad, "Determination of the optimum cutoff grade considering environmental cost," *J. Int. Environmental Application & Science*, vol. 3, no. 3, pp. 186-194, 2008.
- [7] J. Gholamnejad, "Incorporation of rehabilitation cost into the optimum cut-off grade determination," *Journal of the SAIMM*, vol. 109, no. 2, pp. 89-94, 2009.
- [8] Y. Azimi, M. Osanloo, and A. Esfahanipour, "Selection of the open pit mining cut-off grade strategy under price uncertainty using a risk based multi-criteria ranking system," *Archives of Mining Sciences*, vol. 57, no. 3, pp. 741-768, 2012.
- [9] E. Çetin, "Kararsız market koşullarında genetik algoritma ile sınır tenörleri optimizasyonu," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 7, no. 1, pp. 103-112, 2016.
- [10] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [11] R. Dawkins, *The Selfish Gene*. Oxford University Press, 1976.
- [12] P. Garg, "A Comparison between Memetic algorithm and Genetic algorithm for the Cryptanalysis of Simplified Data Encryption Standard Algorithm," *IJNSA*, vol. 1, no. 1, pp. 34-42, Apr. 2009.
- [13] P. A. Dowd, "Application of dynamic and stochastic programming to optimise cut-off grades and production rates," *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A: Mining Industry*, Vol. 81 pp. 160-179, 1976.
- [14] E. Cetin, "Assessment of costs in cut-off grades optimization by using grid search method," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, vol.34, no. 2, pp. 67-80, Jan. 2018.
- [15] E. Cetin, and A. Dalgic, "The optimization of cut-off grades by means of memetic algorithms," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, vol.38, no. 1, pp.107-122, 2022.