

# Sınır Tenör Kararlarında Üretim Kapasite Kısıtlarının Etkileri

## The Effects of Production Capacity Limits in The Cut off Grade Decisions

Adnan KONUK

O.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü, ESKİŞEHİR

Gürkan YERSEL

A.Ü. Bozüyük Meslek Yüksek Okulu, BİLECİK

### ÖZ

*Bu çalışmada, sınır tenör kararlarında üretim kapasite kısıtlarının etkileri araştırılmaktadır. Bu amaçla öncelikle, rezerv-tenör dağılımlarının normal veya lognormal olması durumları için sınır tenör, tonaj oranı ve ortalama tenör ilişkileri ele alınmaktadır. Daha sonra, tesis besleme, tesis çıkış ve maden tükenme kapasitesi kısıtlarının sınır tenör kararlarına etkileri analiz edilmektedir. Bu araştırmanın uygulama çalışması ise Etibank Kütahya Gümüşköy Gümüş Madeni İşletmesi üretim tesisleri ve sondaj verileri kullanılarak gerçekleştirilmektedir.*

### ABSTRACT

*In this study, the effects of production capacity limits are investigated in the cut off grade decisions. Firstly, the relationships among the cut off grade, average grade and tonnage are analyzed in case of both normal and lognormal distributions for reserve-grades distribution. Second, the effects to the cut off grade decisions that are limited in feeding to plant, output from plant and mine depletion capacities are analyzed. Finally, applications of this research are done by using the data of production plants and drill-holes of Etibank-Gümüşköy Silver Mine Company.*

### GİRİŞ

Sınır tenör, madencilikte yatırım ve işletme dönemi kârlılıkları üzerinde etkili olan en önemli değişkenlerden birisidir. Yatırım projelerinin hazırlanması aşamasında yapılacak bir sınır tenör optimizasyonu ile en iyi yatırım kararı alınabilir. İşletme aşamasında alınacak sınır tenör kararları ile ise maden işletmesi, günün değişen ekonomik ve teknik koşullarına uyumlu bir üretim yapabilir.

Maden işletmelerinde, çeşitli üretim kademelerinde kapasiteler, teknik ve ekonomik zorluklar nedeniyle temel olarak aşağıdaki gibi üç farklı şekilde kısıtlanmış olabilir:

a) Konsantre ve/veya rafineri tesisleri konsantre cevher veya metal çıkış kapasitesinin sabit olması (Tesis Çıkış Kapasitesi Kısıtı),

b) Konsantratör ve/veya rafineri tesisleri konsantre cevher veya metal çıkış kapasitesinin sabit olması (Tesis Çıkış Kapasitesi Kısıtı),

c) Maden yatağında cevher üretim ve/veya dekapaj kapasitesinin değiştirilememesi (Maden Tükenme Kapasitesi Kısıtı).

Ekonomik ve teknik koşullara uygun sınır tenör kararlarının uygulanması sırasında ise, bu işletme kısıtlarının etkisiyle konsantratör-rafineri tesisleri besleme kapasitesi, konsantre cevher veya metal çıkış kapasitesi, maden yatağı tükenme kapasitesi ve maden yatağı tükenme ömrü artar veya azalır. Kurulu bir işletmede tesis ve tükenme kapasitelerinde meydana gelebilecek artışlar ek yatırımları, azalmalar ise kullanılmayan atıl kapasiteleri gündeme getirecektir. Bu durumda ise, ek yatırımlar için ise işgücünde azaltmaya gidilmesi ve

mümkünse atıl kalan makine ve ekipmanların elden çıkarılması gibi hususlar sözkonusu olacaktır.

Tesislerin konsantre cevher veya metal üretim kapasitelerinin artması sözkonusu olduğunda ise, ürünlerin pazarlanabilme olanaklarının araştırılması gerekir. Pazarlama olanaklarının kısıtlı olması halinde, konsantre cevher veya metal üretim kapasitelerinin artırılması, gereksiz stoklama giderlerine neden olabilir.

Sınır tenör kararlarıyla birlikte üretim kapasitelerindeki değişimlere bağlı olarak, maden yatağı tükenme ömrünün artması veya azalması, özellikle yapılan yatırımların amortismanlarının ve yıllık nakit akımlarının bugünkü değerlerinin artması veya azalmasında önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Maden işletmesine kurulacak tesislerin ve satın alınacak makina-ekipmanların ömürleri ile madenin tükenme ömrünün uyumlu olması gerektiği düşünüldüğünde de, sınır tenör kararlarıyla birlikte maden ömründeki değişimin önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, maden ömrü arttıkça yıllık nakit akımları değişken ve parametrelerinin tahminindeki belirsizliklerin boyutunda artacağı gözönünde bulundurulmalıdır (Ross-Watt ve Mackenzie, 1979).

Sınır tenör kararları konusunda yapılmış olan çalışmaların çoğunda, fizibilite aşamasında sınır tenör optimizasyonu ile ilgilenildiğinden, üretim kapasite kısıtları ihmal edilmektedir. Bununla birlikte, Lane (1964, 1988), çeşitli sınır tenör seçenekleri için maden, konsantratör, rafineri ve pazarlama kısıtlarının dikkate aldığı çalışmalarında, herbir koşul için sınır tenör seçenekleri için net bugünkü değerleri hesapladıktan sonra, çizimle optimum sınır tenörleri belirlemektedir. Blackwel (1970), Lane'nin yöntemine benzer olan çalışmasında açık ocak, konsantratör ve pazar kısıtlarından bahsetmektedir. Taylor (1972) da, sınır tenörle ortalama tenör ve tonaj oranı arasındaki istatistiksel ilişkilere de değindiği çalışmasında, maden yatağından cevher elde edilebilirliği, cevher hazırlama ve zenginleştirme, ürün eldesi ve pazarlama kısıtları altında optimum sınır tenörün hesaplanmasını çalışmada, İsveç'teki bir yeraltı bakır madeni işletmesinde, maden üretiminin ve ömrünün sabit olması koşulları için yapılan sınır tenör optimizasyonun sonuçlarını tartışmaktadırlar.

Bu çalışmada, sınır tenör kararlarında üretim kapasite kısıtlarının etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle, rezerv-tenör dağılımının normal veya lognormal olması durumları için sınır te-

nörün üzerindeki rezervin tonaj oranı ve ortalama tenörlerinin hesaplanması ele alınmaktadır. Daha sonra, tesis besleme, tesis çıkış ve maden tükenme kapasitesi kısıtları altında sınır tenör kararlarından etkilenen değişken değerlerinin hesaplanması yöntemleri geliştirilmektedir. Son olarak ise, Etibank-Kütahya 100. Yıl Gümüş Madeni İşletmesi rezerv-tenör verileri kullanılarak uygulama çalışması gerçekleştirilmektedir.

### SINIR TENÖR, TONAJ ORANI VE ORTALAMA TENÖRİLİŞKİSİ

Maden yataklarından alınan örneklerin ortalama tenörleri rassal dağıldığında, örnek tenörleri belirli aralıklarla sınıflandırılarak, her tenör aralığına düşen frekansları (cevher tonajı veya hacmi) saptanabilir. Bu frekanslara göre yapılacak istatistiksel hesaplamalarla rezerv-tenör dağılımı belirlenebilir (Nasuf, 1983). Dağılımın istatistiksel parametreleri yardımıyla da, belirli bir sınır tenörün üzerindeki cevher kütlelerinin tonajı (rezervi) ve ortalama tenörü hesaplanabilir (Parker, 1979; David, 1977).

Rezerv-tenör dağılımları genellikle normal veya lognormal dağılımın özelliklerini göstermekte olup, bu dağılımlar için sınır tenör ile ilişkili parametrelerin hesaplanması aşağıda açıklanmaktadır.

#### Normal Dağılım

Rezerv-tenör dağılımının normal olması durumunda, sınır tenöre bağlı olarak tonaj oranı ve ortalama tenör aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir (Parker, 1979; David, 1977).

#### Tonaj Oranı

Standart normal dağılımın özelliklerinden yararlanılarak tonaj oranı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Z_c = (X_c - \mu) / \sigma$$

$$T_c = 1 - F(Z_c)$$

Burada,  $Z_c$  = sınır tenörün standart normal değeri,  $X_c$  = sınır tenör,  $\mu$  = dağılımın aritmetik ortalaması,  $\sigma$  = dağılımın standart sapması,  $T_c$  = sınır tenörün üzerindeki cevher rezervi tonajının toplam cevher rezervi tonajına oranı,  $F(Z_c)$  = sınır tenörün standart normal değeri için kümülatif olasılık fonksiyonunun değeridir.

$Z_c$  standart normal değerine bağlı olarak  $F(Z_c)$  kümülatif olasılık yoğunluk fonksiyonu değeri istatistik kitaplarında verilen Standart Normal Yoğunluk Fonksiyonu çizelgelerinden elde edilebileceği gibi, aşağıdaki

eşitlikle de yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir (David, 1977).

$Z_c < 0$  için;

$$F(Z_c) = 0,5 + 0,5 \cdot \sqrt{1 - e^{(-2/\pi) \cdot (Z_c)^2}}$$

$Z_c \geq 0$  için;

$$F(Z_c) = 0,5 - 0,5 \cdot \sqrt{1 - e^{(-2/\pi) \cdot (Z_c)^2}}$$

Hesaplanan tonaj oranıyla toplam cevher rezervinin çarpımından, sınır tenörün üzerindeki cevher rezervi hesaplanabilir:

$$R_c = R_e \cdot T_c$$

Burada,  $R_c$  = sınır tenörün üzerindeki cevher rezervi,  $R_e$  = toplam cevher rezervidir.

### Ortalama Tenör

Belirli bir sınır tenörün üzerindeki cevher kütesinin ortalama tenörü;

$$X_c = \mu + [(\sigma / T_c) \cdot f(Z_c)]$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada,  $X_c$  = sınır tenörün üzerindeki cevher kütesinin ortalama tenörü,  $f(Z_c)$  =  $Z_c$  standart normal değeri için normal olasılık yoğunluk eğrisinin yüksekliği olup,

$$f(Z_c) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \exp(-0,5 \cdot Z_c^2)$$

eşitliğinden hesaplanabilir.

### Lognormal Dağılım

Lognormal dağılım için sınır tenöre bağlı olarak tonaj oranı ve ortalama tenör aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

#### Tonaj Oranı

Cevher tenörlerinin logaritmik değerlerinin normal dağıldığı lognormal dağılımında da tonaj oranı, logaritmik sınır tenör için hesaplanan standart normal değerden elde edilebilir.

$$Z_c = (\ln X_c - \infty) / \beta$$

$$T_c = 1 - F(Z_c)$$

Burada,  $\infty$  = logaritmik aritmetik ortalama,

$\beta$  = logaritmik standart sapmadır.

### Ortalama Tenör

Rezerv- tenör dağılımı lognormal olan bir maden yatağında sınır tenörün üzerindeki cevher kütlelerinin ortalama tenörü aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

$$X_c = (\mu / T_c) \cdot [1 - F(Z_c - \beta)]$$

Burada,  $F(Z_c - \beta)$  standart normal değerinin kümülatif olasılık fonksiyonu değeridir.

### SINIR TENÖR KARARLARINDA ÜRETİM KAPASİTE KISITLARININ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tesis besleme, tesis çıkış ve maden tükenme kapasitelerinden herhangi birinin kısıtlı olması durumunda, alınacak bir sınır tenör kararının diğer kapasite değişkenleri ve maden tükenme ömrü üzerindeki etkilerini araştıran yöntemler aşağıdaki bölümlerden ele alınmaktadır.

#### Tesis Besleme Kapasitesi Kısıtlı

Tesis Besleme kapasitesi (BK) kısıtlı (sabit) olduğunda, i. sınır tenör seçeneği için yıllık konsantre cevher veya metal çıkış kapasitesi (ÇK<sub>i</sub>);

$$\text{ÇK}_i = \text{BK} \cdot X_{ci}$$

eşitliği hesaplanabilir.

Maden yatağı tükenme ömrü ise ( $M_i$ ) ise;

$$M_i = (R_e \cdot T_{ci}) / \text{BK}$$

olup, burada  $R_e$  = maden yatağının toplam rezervi (ton)dir. Maden yatağı tükenme kapasitesi ( $\text{TK}_i$ ) ise, maden yatağı toplam rezervi ve tükenme ömrüne bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\text{TK}_i = R_e / M_i$$

#### Tesis Çıkış Kapasitesi Kısıtlı

Belirli bir i. sınır tenör seçeneği için maden yatağının içerdiği toplam metal miktarı ( $\text{QM}_i$ );

$$\text{QM}_i = R_e \cdot T_{ci} \cdot X_{ci}$$

eşitliğinde ifade edildiği gibi, cevher rezervine, tonaj oranına ve ortalama tenöre bağlı olarak hesaplanır.

Tesis çıkış kapasitesini (ÇK) sabit olduğu bu durumda i. sınır tenör seçeneği için maden yatağının tükenme ömrü ( $M_i$ );

$$M_i = \text{QM}_i / \text{ÇK}$$

olup, buna bağlı olarak tesis besleme kapasitesi ( $\text{BK}_i$ );

$$\text{BK}_i = (R_e \cdot T_{ci}) / M_i$$

## Sınır Tenör Kararları

olur. Maden yatağının tükenme ömrüne bağlı olarak tükenme kapasitesi de (TK<sub>i</sub>);

$$TK_i = Re / Mi$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

### Maden Yatağı Tükenme Kapasitesi Kısıtlı

Maden yatağı tükenme kapasitesinin (TK) kısıtlı (sabit) olduğu durumda, tükenme ömrüde (M) tüm sınır tenör seçenekleri için sabit olur. Bu nedenle, i. sınır tenör seçeneği için tesis besleme kapasitesi (BK<sub>i</sub>);

$$BK_i = (Re \cdot Tc_i) / M$$

eşitliği ile hesaplanır. Tesis besleme kapasitesine bağlı olarak tesis çıkış kapasitesi (ÇK<sub>i</sub>);

$$CK_i = BK_i \cdot Xc_i$$

eşitliğinde olduğu gibi hesaplanır.

### UYGULAMA ÇALIŞMASI

Sınır tenör kararlarında üretim kapasite kısıtlarının etkilerini araştırmak amacıyla yapılan uygulama çalışmasında, Etibank Kütahya-Gümüşköy Gümüş Madeni İşletmesi Aktepe maden yatağı arama sondajlarından elde edilen rezerv-tenör verileri kullanılmıştır (Demirok, 1984). Maden yatağının rezerv-tenör dağılımının lognormal olduğu saptanmış olup, dağılımın hesaplanan istatistik parametreleri aşağıdaki gibidir.

Dağılım Parametreleri	Değeri
Logarit. Ortalama - $\infty$ - (Ln gr/ton Ag)	4.8223
Log. Stand. Sapma - $\beta$ - (Ln gr/ton Ag)	0.7911
Aritmet. Ortalama - $\mu$ - (gr/ton Ag)	169.901
Standart Sapma - $\sigma$ - (gr/ton Ag)	158.454
Çarpıklık Katsayısı - $\infty_3$	2.981
Basıklık Katsayısı - $\infty_4$	15.037

Rezerv-tenör dağılımı istatistik parametreleri ele alınarak, sınır tenör seçeneklerinin 50, 100, 150, 200 ve 250 gr/ton olması koşullarında sınır tenörlerin üzerinde kalan rezervlerin tonaj oranları ve ortalama tenörleri hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge-1 ve Şekil-1'de verilmiştir.

Maden yatağının sıfırdan büyük tenörleri içeren toplam rezervi 24 772 740 ton olup, rezerv-tenör dağılımını araştırırken değerlendirmeye alınmayan sıfır tenörlü 720 294 ton'luk dekapaj malzemesi de sahada mevcuttur.

Gümüşköy Gümüş Madeni İşletmesi konsantratör-

rafineri tesisi 50 gr/ton Ag sınır tenör ile yılda 122 ton metal Ag üretecek şekilde taraslandırılmış olup (Koçak, 1987), bu durumda;

-Tesis besleme kapasitesi (BK) =	955 738 ton/yıl
-Tesis çıkış (metal) kapasitesi (ÇK) =	122 ton/yıl
- Maden tükenme kapasitesi (TK) =	1.092 272 ton/yıl
- Maden tükenme ömrü (M) =	22.68 yıl

olmaktadır.

Yukarıdaki veriler temelinde, tesis besleme, tesis çıkış ve maden tükenme kapasitesinin sabit olduğu üretim kapasite kısıtları altında, sınır tenör kararlarından etkilenen değişkenlerin değerlerinin hesaplanan sonuçları Çizelge-2 ve Şekil 2'de verildiği gibidir.

Şekil-2'den de izlendiği gibi, Gümüşköy Gümüş Madeni İşletmesinde;

- \* Tesis besleme kapasitesinin kısıtlı olması halinde;
  - Maden tükenme kapasitesi ve tesis çıkış (metal) kapasitesi hızla artmakta,
  - Maden tükenme ömrü azalmaktadır.
- \* Tesis çıkış kapasitesinin kısıtlı olması halinde;
  - Maden tükenme kapasitesi artmakta,
  - Tesis besleme kapasitesi ve maden tükenme ömrü azalmaktadır.
- \* Maden tükenme kapasitesinin kısıtlı olması halinde;
  - Maden tükenme ömrü sabit kalmakta,
  - Tesis besleme ve çıkış kapasiteleri hızla azalmaktadır.

### SONUÇ

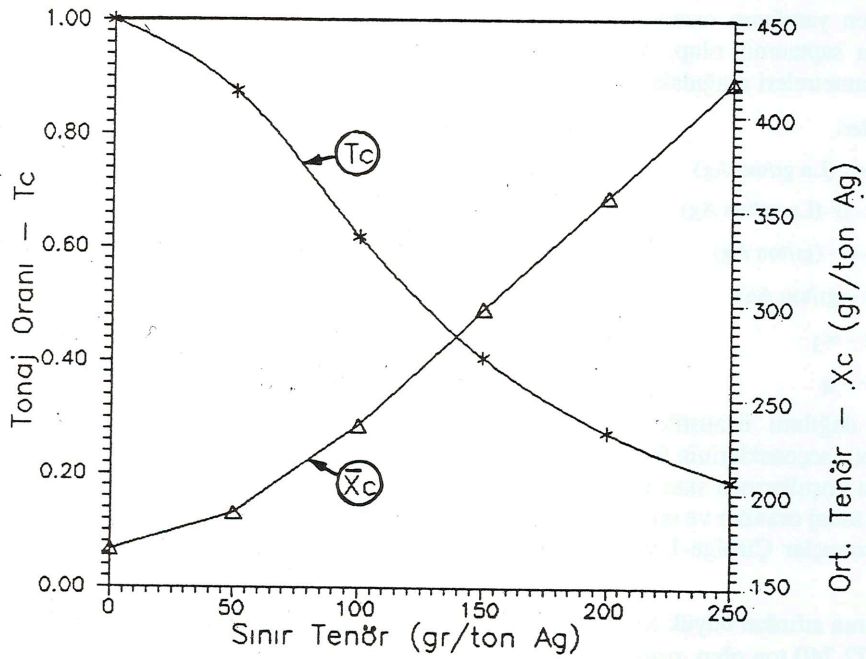
Tesisleri kurulmuş, yatırımları tamamlanmış ve üretime geçmiş olan maden işletmelerinde, ekonomik ve teknolojik gelişmelere uygun sınır tenör kararlarının alınması aşamasında üretim kapasitelerinden herhangi birinin kısıtlı olması halinde, diğer kapasite değişkenleri ve maden tükenme ömrü bu kısıttan önemli oranda etkilenmektedir.

İşletmelerde uyulanmakta olan sınır tenörün artırılması veya azaltılması durumlarında tesis veya maden tükenme kapasitelerinde meydana gelebilecek değişimler, yeni ek yatırımlar ile üretim artış ve azalışlarını gündeme getirebilecektir. Bu nedenlerle, işletme kısıtları altında sınır tenör kararlarının alınması, mutlaka ekonomik analizleri içerecek optimizasyon çalışmaları

## Sınır Tenör Kararları

Çizelge 1. Gümüşköy Gümüş Madeni Yatağında sınır tenör seçenekleri için cevher tonaj oranı ve ortalama tenörleri.

Sınır Tenör $X_{c_1}$ (gr/ton Ag)	Tonaj Oranı $T_{c_1}$	Ortalama Tenör $X_{c_1}$ (gr/ton Ag)
0	1.0000	169.90
50	0.8750	189.10
100	0.6182	235.45
150	0.4058	297.18
200	0.2737	357.00
250	0.1884	417.63

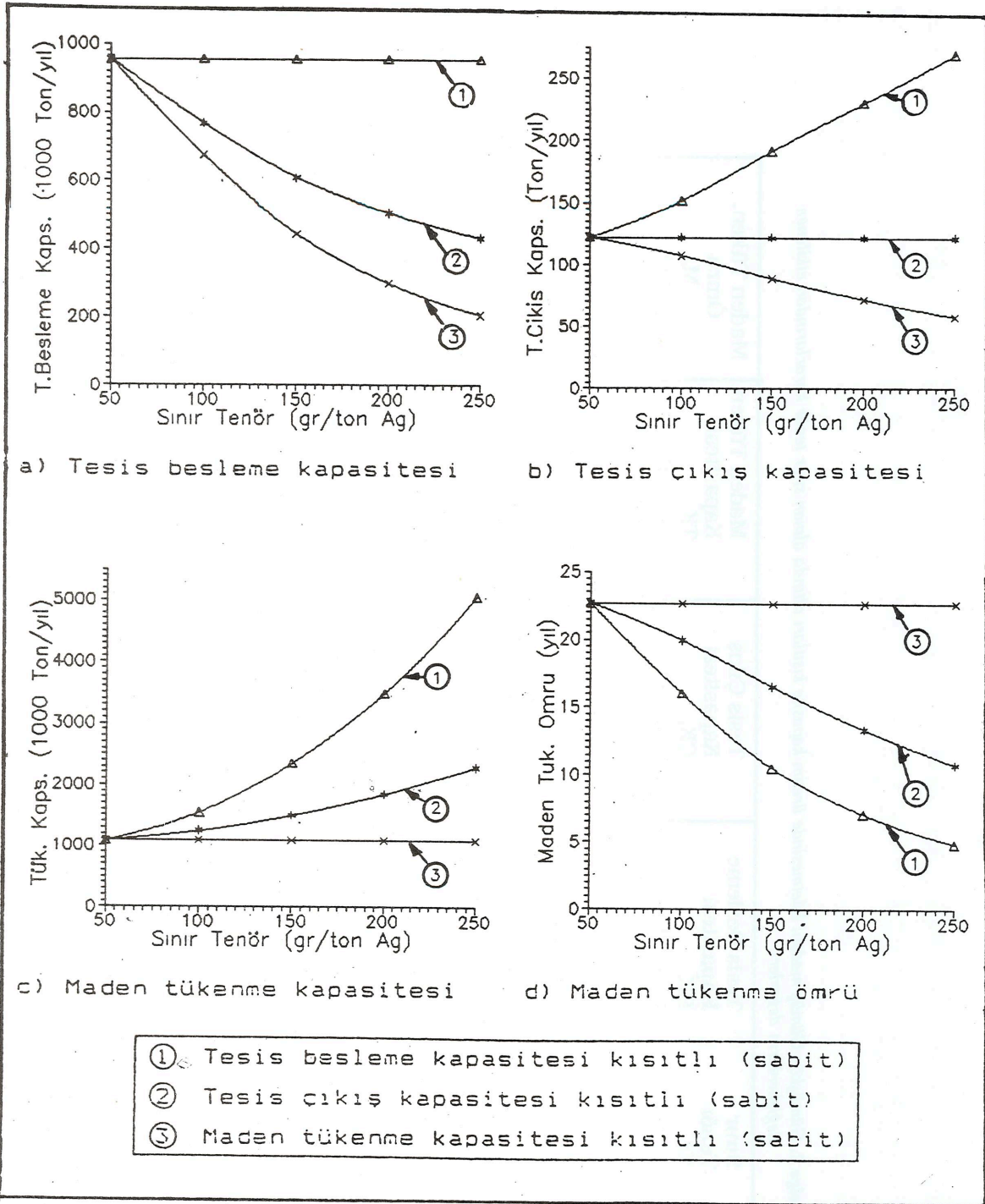


Şekil 1. Gümüşköy Gümüş Madeni Yatağında sınır tenörle cevher tonaj oranı ve ortalama tenör ilişkisi.

Çizelge 2. Gümüşköy Gümrük madeni İşletmesinde üretim kapasite kısıtları altında alınan sınır tenör kararlarından etkilenen değişkenlerin değerleri.

Sınır Tenör $X_{c_1}$ (gr/ton)	Tesis Besleme Kapasitesi $BK_1$ (ton/yıl)	Tesis Çıkış Kapasitesi $ÇK_1$ (ton/yıl)	Maden Tüken. Kapasitesi $TK_1$ (ton/yıl)	Maden Tüken. Ömrü $M_1$ (yıl)
<b>Tesis Besleme Kapasitesi Sabit</b>				
50	955 738	122.000	1 092 272	22.68
100	955 738	151.894	1 546 363	16.02
150	955 738	191.718	2 354 823	10.52
200	955 738	230.309	3 494 039	7.09
250	955 738	269.423	5 076 381	4.88
<b>Tesis Çıkış Kapasitesi Sabit</b>				
50	955 738	122.000	1 092 272	22.68
100	767 645	122.000	1 241 741	19.95
150	608 154	122.000	1 498 653	16.53
200	506 370	122.000	1 850 093	13.39
250	432 948	122.000	2 298 028	10.78
<b>Maden Tükenme Kapasitesi Sabit</b>				
50	955 738	122.000	1 092 272	22.68
100	675 243	107.315	1 092 272	22.68
150	443 244	88.913	1 092 272	22.68
200	298 955	72.040	1 092 272	22.68
250	205 784	58.011	1 092 272	22.68

## Sınır Tenör Kararları



Şekil 2. Gümüşköy Gümüş Madeni İşletmesinde üretim kapasite kısıtları altında alınan sınır tenör kararlarından etkilenen değişkenlerin değerleri.

sonrasında gerçekleştirilmelidir.

Tesis besleme ve metal çıkış kapasitesi kısıtlarının söz konusu olduğu Etibank Gümüş Madeni İşletmesinde, azalan gümüş satış fiyatları karşısında kârlılık marjını korumak amacıyla yapılacak sınır tenör artışlarında, özellikle maden yatağının planlanan ekonomik ömürden önce tükeneceği gözönünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, sınır tenör artışlarıyla birlikte ortaya çıkan kapasite kısıtlarını aşmanın getireceği ek yatırım maliyetinin, projenin karlılığına etkileri de analiz edilmelidir.

### DEĞİNİLEN BELGELER

- Blackwell, M.R.L., 1970, "Some Aspects of the Evaluation and Planning of the Bougainville Copper Project", Decision-making in the Mineral Industry, C.I.M., pp. 261-269.
- David, M., 1977, Geostatistical Ore Reserve Estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, p. 364.
- Demirok, H., Apul, H.R., Özyurt, A. ve İnanc, Ö., 1984, Etibank 100. Yıl Gümüş Madeni İşletmeleri Müessesesi Müdürlüğü Gümüş Madeni Açık İşleme Projesi (I. Revizyon), Kütahya, 132 s.
- Koçak, Y., 1987, Etibank Kütahya Gümüşköy 100. Yıl Konsantrasyon ve İzabe tesisi Projesi Fizibilite Etüdü (VI. Revizyon), Ankara, 91 s.
- Lane, K.F., 1964, "Choosing the Optimum Cut-Off Grade", Quaterley of the Colorado School of Mines, No.59, pp. 811-829.
- Lane, K.F., 1988, The Economic Definition of Ore (Cut-Off Grades in Theory and Practice), Mining Journal Books Ltd., London, p. 149.
- Nasuf, E., 1983, "Rezerv Hesaplamalarında İstatistiksel Yöntemler ve Bilgisayar Uygulamaları", Türkiye Mad. Bil. ve Tek. 8. Kong. Bildiriler Kitabı, Ankara, s. 201-212.
- Nilsson, D. and Aaro, B., (1985), "Cut-Off Grade Optimization", International Mining, July 1985, pp. 28-33.
- Parker, H., 1979, "The Volume-Variance Relationship: A Useful Tool for Mine Planning", Engineering and Mining Journal, October 1979, pp. 106-123.
- Ross-Watt, D. and Mackenzie, B., 1979, "A Mining Project Evaluation Technique Incorporating the Response of Mine Management to the Resolution of Uncertainty", Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, AIME, New York, pp. 115-127.
- Taylor, H.K., 1972, "General Background Theory of Cut off Grades", I.M.M. Transactions, July 1972, pp. A160-179.