

TÜLOVASI BORAT YATAĞI REZERVİNİN JEOİSTATİSTİKSEL KESTİRİMİ

Geostatistical Estimation of Reserves of Tülovası Borate Deposit

A.Erhan TERCAN (*)
Seyfi KULAKSIZ (*)
Ahmet ŞENTÜRK (*)

ÖZET

Bu çalışma Tülovası borat (B₂O₃) yatağı rezervinin jeostatistiksel kestirimini içermektedir. Değişik uzunluktaki karot örnekleri 1.5 m uzunluğunda eşit karot örneklerine dönüştürüldükten sonra B₂O₃ içeriğinin üç boyutta semi - variogramları çıkarılmış ve modellenmiştir. Bu modeller 40x40x6 m boyutundaki blokların kriging ile kestiriminde kullanılmıştır. Son olarak bu boyuttaki bloklara ilişkin gerçe¹- tenor- tonaj eğrileri elde edilmiştir.

ABSTRACT

This paper includes a geostatistical evaluation of Tülovası borate (B₂O₃) deposit. The study first begins with the semi-variogram modelling of variable B₂O₃. This is followed by three-dimensional block kriging. The deposit was divided into blocks of 40x40x6 m dimensions and the kriged estimate together with the associated kriging variances for each block were determined. Finally the actual grade-tonnage curves were presented.

* Dr.Müh., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe-ANKARA
** Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe-ANKARA
***Doç.Dr., Süleyman Demirel Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İSPARTA

1. GİRİŞ

Maden yataklarının değerlendirilmesinde gözönüne alınan tenor, kalınlık gibi değişkenler uzaklığa bağlı yapısal bir ilişki gösterebilirler. Böyle durumlarda, iki farklı noktadan alınan tenor değerleri arasındaki ilişki, bu noktalar arasındaki uzaklığa bağlıdır; ilişkinin uzaklık arttıkça azalması beklenir. Genellikle belirli bir uzaklıktan sonra bu ilişkinin tümüyle ortadan kalktığı gözlenir. Ters durumda, yani uzaklık azahınca ilişki artar. Sıfır olduğunda ise ilişki en yüksek değerine erişir. Bundan başka, uzaklığa bağlı ilişki, yatağın bir yönünden diğerine farklılık gösterebilir.

Tenor ve kalınlık değişkenleri, böyle yapı gösteren davranışları yanında hemen her zaman bir noktadan diğerine değişen çok düzensiz, rastgele bir davranış da sergiler. Jeostatistik, tenor ve kalınlık gibi değişkenleri bölgesel değişken olarak kabul eder ve jeostatistikte bölgesel değişkenin birbirine zıt iki özelliği (yapısal ve rastlantı özellikleri) rastlantı fonksiyonlarının olasılıksal çatısı altında modellenir. Önce yatağın her noktasında bir rastlantı değişkeni tanımlanır ve bu noktadaki tenor değerinin, rastlantı değişkeninin bir görüntüsü olduğu kabul edilir. Yatağın her bir noktasında tanımlanan rastlantı değişkenlerinin tümünün bir rastlantı fonksiyonunu oluşturduğu ve bölgesel değişkenin de bu rastlantı fonksiyonunun bir görüntüsü olduğu düşünülür. Olasılıksal çıkarsamaları olanaklı kılmak için de rastlantı fonksiyonunun dağılımsal özelliklerinin, bir ötelenme halinde, değişmediği varsayılır.

Çokgen, üçgen, kesit gibi tenor ve rezervin kestirimine ilişkin geometrik yöntemler uzaklığa bağlı ilişki kavramını dikkate almaz ve bu nedenle yanlış sonuçlar verir. Jeostatistikte bölgesel değişkenlerin uzaklığa bağlı değişimleri semi-variogramlar ya da kısaca va-

riogramlar ile ortaya konur:

$$2\gamma(h) = \text{Var}(Z(x) - Z(x+h)) \quad \dots 1$$

Burada h ; uzaklık vektörünü, $\gamma(h)$; semi-variogramı, $Z(x)$ ise x noktasında tanımlanan rastlantı değişkenini göstermektedir. Variogramlar incelenen bölgesel değişkenin süreklilik, anizotropi, etki uzaklığı gibi özelliklerine duyarlı bir anlam kazandırır ve aynı zamanda bölgesel değişkenin bilinmeyen değerlerinin kriging ile kestiriminde kullanılır. Bölgesel değişkenin bir V bloğu üzerindeki bilinmeyen ortalama değerinin kriging kestiricisi

$$Z(V) = \sum_{i=1}^n Z(X_i) \quad \dots 2$$

ile verilir. Burada X_i 'ler $Z(X_i)$, $i=1, \dots, n$ örneklerine verilen ağırlıklardır. Bu ağırlıklar, kestirim hatasının beklenen değeri sıfır ve varyansı en küçük olacak şekilde belirlenir ve aşağıda verilen kriging sisteminin çözümünden elde edilir.

$$E \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i - X_i) + H = Y(X_j - V)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad j=1, \dots, n \quad \dots 3$$

Burada $y(x_i - V)$; V bloğu ile X_i noktası arasındaki variogramın ortalama değerini, $y(X_j - x_p)$; X_j ve x_p noktaları arasındaki variogramın değerini, λ_i ise

Lagrange çarpanını göstermektedir.

Kriging'in bir avantajı kestirilen değerlere ilişkin hata varyansını bize vermesidir. Bu varyans, kriging varyansı olarak bilinir ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir;

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \dots 4$$

Ancak, kriging varyansı tenor değerlerine bağlı değildir. Bu yüzden oldukça yatık tenor dağılımlarının varlığında lokal kestirime ilişkin anlamlı güven aralıkları vermez (Tercan, 1993).

Bu çalışmadan, Tülovası borat yatağı rezervinin jeostatistiksel yöntemle kestirimi amaçlanmaktadır. Bu amaçla borat tenorunun üç boyutta deneysel varyogramları hesaplanmış, daha sonra varyogramlar modellenmiştir. 40x40x6 m boyutundaki blokların kriging ile kestiriminden sonra tenör-tonaj eğrileri elde edilmiştir.

2. JEOLOJİ

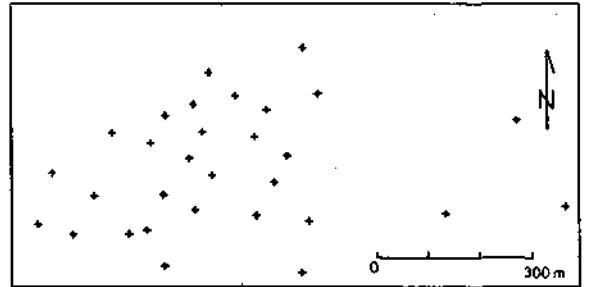
Tülovası borat yatağı Balkesir ili Bigadiç ilçesi Osmanca köyü batısı ile Simav çayı doğu kıyası arasında yer almakta ve halen açık işletme yöntemiyle işletilmektedir. Sahada madencilik faaliyetleri açısından önemli üç litolojik birim ayırt edilebilir. Alt boratlı birim, marn, kireçtaşı, kiltası, tuf, sutaşı ve boratlı seviyelerin ardalanmasından oluşur. Cevherli zon büyük ölçekte kolemanitten oluşmuş olup, daha sonra üleksitten meydana gelmiştir.

Üst tuf birimi alt boratlı birimin üstüne uyumlu olarak gelmekte ve kaba taneli tüflerle başlamaktadır. Etüd sahasında, Tülovasının büyük kısmı Kuvaterner oluşuk ve kısmen alt kısımları Pliyokuvaterner çökellerden oluşmuştur. Bu

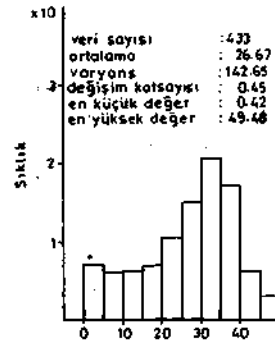
çökeller, kireçtaşı çakıllı, kum, kil, tuf kökenli marn ve toprak örtüsünden meydana gelmiştir (Kulaksız ve Şentürk, 1983).

3. VERİLER

Tülovası borat yatağı rezervinin kestiriminde, veri olarak, 30 adet sondajdan elde edilen karot örnekleri gözönüne alınmıştır. Dik açıdan yapılan sondajların saha üzerindeki yerleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Karot uzunlukları 0.2 cm ile 3.0 m arasında değişmektedir. Jeostatistik aynı büyüklükteki (aynı hacim ve aynı uzunluk) örnekler üzerinde çalışıldığından, değişen uzunluktaki karot örnekleri, her biri 1.5 m uzunluğunda eşit karot örneklerine dönüştürülmüştür. Eşitleme işlemi 433 adet karot örneği vermiştir. Bu örneklerin B_2O_3 içeriklerinin histogramı Şekil 2'de sunulmuştur. Histogram, sola çarpık bir dağılım göstermektedir. Bununla birlikte değişim katsayısı düşüktür.



Şekil 1. Tülovası sondaj lokasyonları



Şekil 2. B_2O_3 değerlerinin histogramı

4. VARIOGRAM ANALİZİ VE MODELLEME

Variogram ilk olarak yatağı dik yönde açılmış sondajlar boyunca hesaplanmıştır. Bu variogram küçük ölçekte 10 m civarında bir yapı göstermektedir (Şekil 3a). Nugget varyansı yüksektir. Orijindeki süreksizliğe 15 metreden daha küçük uzaklıklarda bir yapının saklı olması ya da ölçüm ve analiz hataları yol açmış olabilir. Yatay yönde hesaplanan variogramlar ise bir anizotropinin varlığına işaret etmektedir (Şekil 3b). Gerçekten de bu variogramlarda yapısal uzaklık (range) 80-90 m civarındadır. Borat içeriği için kabul edilen üç boyutlu variogram modeli, anizotropik küresel modeldir:

$$\gamma(h) = 55 + 85(1.5h/a)^{-0.5} - 0.5(h/a)^{0.5}, h < a(0)$$

$$\gamma(h) = 140, h < a(e) \dots 5$$

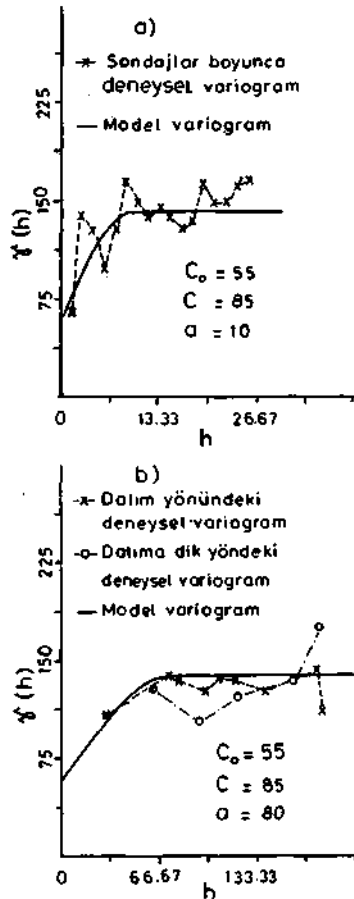
$$\gamma(h) = 0, h = (0)$$

Burada a (sondaj boyunca) = 10 m
a (dalım yönünde ve dalma dik yönde) = 80 m'dir.

Nugget varyansının modellenmesinde, daha doğru sonuçlar vereceği için, sondajlar boyunca hesaplanan variogram kullanılmıştır. Variogram model parametrelerinin doğruluğu geri kestirim tekniği kullanarak değerlendirilmiştir. Bunun için her örnek sırayla veri setinden uzaklaştırılmış ve geri kalan örnekler ve variogram modeli kullanılarak kriging ile kestirilmiştir.

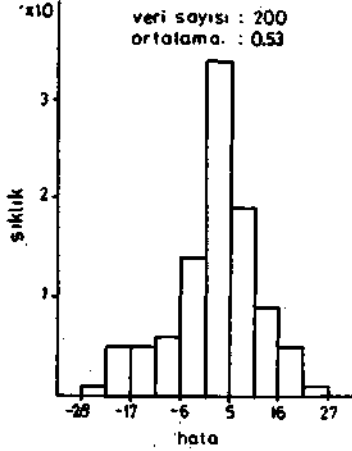
Mükemmel bir uyum için kestirim hatlarının (gerçek değer ve kestirilen değer arasındaki farkların) dağılımı, sıfır ortalama ve minimum varyansla simetrik olmalıdır. Ayrıca, koşullu yansız kestirimler için gerçek değerlerin kestirilen değerler üzerindeki doğrusal regresyonu orijinden geçen 45 derece eğimli bir doğru vermelidir. Bu koşullu yansızlık olarak bilinir. Diğer bir ölçütte, kestirim hatalarının kareler ortalamasını, kriging varyansının ortalaması ile karşılaştırmaktır. İyi bir kestirim için bunların birbirine eşit ya da yakın olması istenir.

Gerçek kestirim için en az örnek sayısı 4 en çok da 16 olarak alınmıştır. Kestirim komşuluğunu büyük eksen 100 m küçük eksen 12 m olan bir elips oluşturmaktadır. Bu komşulukta oktant örnek arama işlemi kullanılmıştır. Kestirim komşuluğunun belirlenmesi ve bu komşuluk içinde örnek seçimi hakkında ayrıntılı bilgi Deutsch and Journé (1992)'den elde edilebilir. Kestirim hatlarının dağılımı Şekil 4, kestirilen değerlerin gerçek değerlere karşı doğrusal regresyonu ise Şekil 5'de verilmiştir. Karşıklıya yol açmaması için. Şekil 5'te bütün noktalar gösterilmemiş belirli aralıktaki (yaklaşık %6 artışlarla) kestirilen değerlere karşılık gelen gerçek

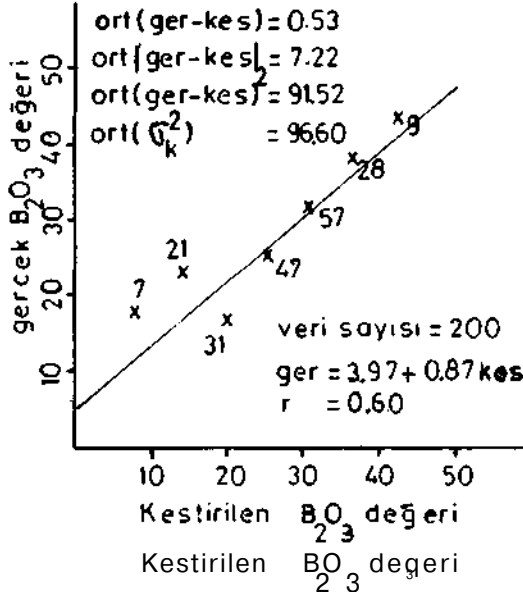


Şekil 3. B2O3 değişiminin üç boyutta variogramları

değerlerin ortalamaları verilmiştir. Örneğin ilk nokta 5.68 ile 11.41 arasında 7 tane kestirilen B₂O₃ değeri olduğunu ve bunlara karşılık gelen gerçek değerlerin ortalamasının da 8.66 olduğunu ifade etmektedir. Bu sonuçlar seçilen modelin gerçek değerleri iyi bir şekilde kestirdiğini göstermektedir.



Şekil 4. Kestirim hatalarının histogramı

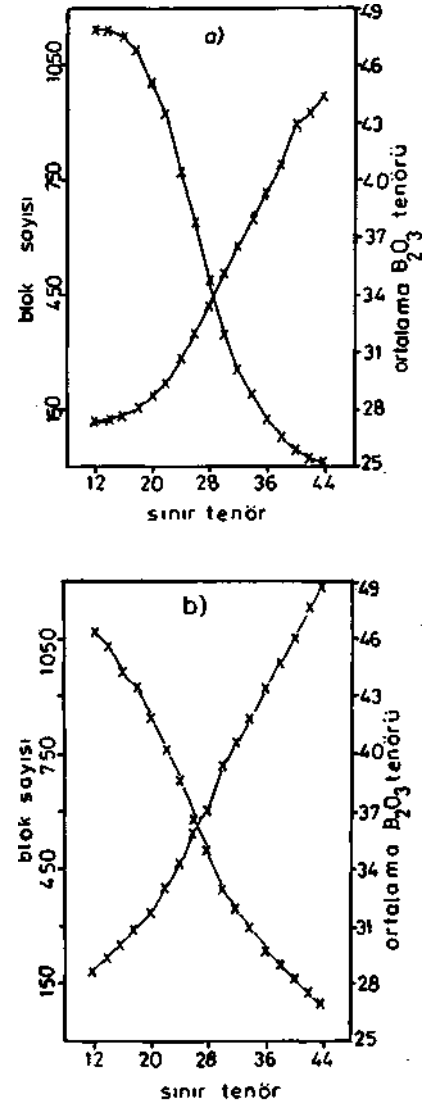


Şekil 5. Kestirilen değerlerdeki %6'lık artışlar için gerçek değerlerin ortalamaları

5. BLOK KRİGİNG VE TENÖR-TONAJ EĞRİLERİ

Tülovası borat yatağı 40x40x6 m boyutlarında bloklara bölünmüştür. Burada 6 m, açık ocaktaki basamak yük-

seklğine karşılık gelmektedir. Bloğun diğer boyutları keyfi olarak belirlenmiştir. Her bir bloğun ortalama borat içeriği kriging ile kestirildikten sonra kestirilen blok değerlerine ilişkin tenör-tonaj eğrileri hesaplanmış ve bunlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da cevher miktarı, belirli bir sınır tenörün üstündeki blok sayısı olarak gösterilmiştir. Ortalama B₂O₃ tenörü de bu blokların B₂O₃ tenörlerinin ortalamasıdır.



Şekil 6. 40x40x6 m boyutundaki bloklara ilişkin tenör-tonaj eğrileri, a) Kestirilen blok değerlerine ilişkin eğriler, b) Gerçek tenör-tonaj eğrileri

Kriging'in bir özelliği, kestirilen değerlerin varyansının gerçek değerlerin varyansından daha küçük olmasıdır. Bu matematiksel olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir:

$$\sigma^2(V/D) = \sigma^2(V/D) + 0_k - 2.2^{\wedge}1 \quad \dots 6$$

Bu eşitlikte $\sigma^2(V/D)$; D yatağı içinde V bloklarının varyansını, $\sigma^2(V/D)$; V bloklarının kestirilen değerinin varyansını, σ^2 • kriging varyanslarının ortalamasını,

f_i ; Lagrange çarpanlarının ortalamasını göstermektedir (Journel-and Huijbregts, 1978). Genelde λ değeri sıfıra çok yakındır. Eğer blokların gerçek değerlerinin dağılımı ile kestirilen değerlerinin dağılımı arasındaki fark yalnızca varyanstan kaynaklanıyorsa V bloklarına ilişkin gerçek tenör-tonaj eğrileri (6) ifadesi kullanarak hesaplanabilir. Bu varsayım altında gerçek tenör-tonaj eğrileri hesaplanmış ve Şekil 6b'de gösterilmiştir.

6. SONUÇLAR

Bölgesel değişkenlerin semivariogram fonksiyonları ile uzaklığa bağlı değişimlerinin belirlenmesi jeostatistiksel incelemenin ilk adımını oluşturur. Bu çalışma B_2O_3 içeriğinin üç boyutlu deneysel semi-variogramlarının küresel model ile modellenebileceğini göstermektedir. Bu modeller daha sonra 40x40x6 m boyutundaki blokların ortalama B_2O_3 değerlerinin kriging ile kestiriminde kullanılmıştır. Krig edilen blok değerleri ocak planlamasına bir baz teşkil edebilirler. Örneğin, bu çalışmada blokların kestirilen B_2O_3 değerleri, yatağa ilişkin tenör-tonaj eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Ocak planlamasında, ortalama blok değerleri yanında, her bir bloğa ilişkin tenor dağılımının da bilinmesi gerekebilir. Böyle durumlarda, tenor dağılımları ya pa-

rametrik (disjunctive kriging, multi-gaussian kriging) ya da parametrik olmayan (indikatör kriging, olasılık kriging) jeostatistiksel teknikler ile kestirilebilir. İndikatör kriging kullanarak Tülovası'nda blokların tenor dağılımının kestirimi ile ilgili çalışmalar halen devam etmektedir.

KAYNAKLAR

DEUTSCH, C.V. and JOURNEL A.G., 1992, "GSLIB, Geoistical Software Library and User's Guide", Oxford University Press, 340 p.

JOURNEL, A.G. and HUIJBREGTS, Ch.J., 1978, "Mining Geostatistics", Academic Press, 600 p.

KULAKSIZ, S. ve ŞENTURK, A., 1983. "Tülovası Açık İşletme Ön Projesi", Bölüm 2, Hacettepe Üniversitesi, 68 s.

TERCAN, A.E. 1993, "Nonparametric Methods for Estimating Conditional Distributions and Local Confidence Intervals". Ph.D.Thesis, The University of Leeds, 156 p.