

## Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeostatistiksel Simülasyon Yöntemlerinin Kullanılması

### Usage Of The Geostatistical Simulation Methods In Mineral Deposit Evaluation

Cem SARAÇ

Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
Jeoloji Mühendisliği Bölümü  
06532 Beytepe ANKARA

#### ÖZ

Jeostatistiksel simülasyon yerbilimlerinde karşılaşılan problemlerin çözümünde etkin bir yöntem olarak son yıllarda çok yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Genel jeolojik özelliklerin saptanılmasında, litolojik birimler arasındaki kimyasal kompozisyonunu incelenmesinde, geçirgenlik ve gözeneklilik gibi hidrojeolojik parametrelerin belirlenmesinde, hidrojeolojik modellemelerde, maden işletme planlarının yapılmasında ve tenör-tonaj dağılımlarının saptanılmasında jeostatistiksel simülasyon etkin bir yöntem olarak karşınıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada jeostatistiksel simülasyon genel olarak verildikten sonra, koşullu-koşulsuz simülasyon ve değişik simülasyon yöntemlerine sırası ile değinilecektir. Araştırmada uygulama olarak Kızılyüksek-Yataardıç (Karsantı/Adana) krom cevherleşmesi incelenmiştir. Toplam uzunluğu 4772 metre olan 26 sondajdan elde edilen krom analiz değerleri kullanılarak veri analizi yapılmıştır. Veri analizi sonucunda % 4.40 ortalama, % 2.43 standart sapma ve 0.55 değişim katsayısı gösteren verilerde pozitif bir dağılım gözlenmiştir. Cevherleşmenin 3 temel yönünde variogramlar hesaplanarak, tenör dağılımı uzaklığa bağlı olarak modellenmiş ve model parametreleri de ayrıca modelin güvenilirliğinin saptanılması için geri kestirim yöntemi ile kontrol edilmiştir. Son aşamada da cevherleşme koşullu simüle edilerek, sonuçlar ve tenör-blok haritaları hazırlanmıştır.

#### ABSTRACT

The simulation approach to geological problems has received considerable attention the last few years. Applications include determination of major geologic patterns, chemical compositions of different lithological units, hydrogeological parameters such as porosity and permeability, hydrogeological modelling, determination of mine planning and grade-tonnage curves.

After a preliminary review of geostatistical simulation, conditional and non-conditional simulation and different simulation methods will be given. Kızılyüksek-Yataardıç (Karsantı/Adana) chromium mineralisation has been considered as a case study. The data is derived from 26 drillholes distributed over the area. The total depth of the 26 drillholes was 4772 m. Using a basic statistics treatment of data, a positive low skew distribution with the mean of 4.40%, the standard deviation of 2.43%, and the coefficient of variation of 0.55 has been observed. Experimental variograms representing three main directions were calculated, and the kriging back estimation technique. Finally, conditional simulation was done and the results and the simulation maps were prepared.

#### 1. GİRİŞ

Simülasyon ilk defa, 1940 yılında John Neumann'ın Monte Carlo analiz yöntemini nükleer reaktörlerin yalıtımı ile ilgili problemlere uygulamasıyla kullanılmaya başlamıştır (Harbaugh and Bonham-Carter, 1970). Bundan önce simülasyon, bilinmeyen bir şeyin ne olabileceğini tahmin etme olarak kullanılmaktaydı. Daha ileri

yıllarda yüksek kapasiteli, hızlı bilgisayarların gelişmesi ve ayrıca matematiksel modellemelerin önemi arttıkça, simülasyonun bir çok değişik alanda kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu araştırma da, simülasyonun yalnız yerbilimlerindeki önemine değinilecek ve maden yataklarının değerlendirilmesi açısından bir uygulama sunulacaktır.

## 2. SİMÜLASYON TANIMI VE SİMÜLASYON TEKNİKLERİ

Simülasyonun amacı, elimizdeki mevcut bilgilerden yararlanarak, bu bilgilere uygun veriler üretmektir. Bu araştırmada simülasyon tekniklerini koşullu ve koşulsuz simülasyon olarak genelde 2 kısma ayırabiliriz:

i) Koşulsuz simülasyon: İstenilen ortalama ve kovaryansda veri üretimidir.

ii) Koşullu simülasyon: Örnekleştirilmiş lokasyonlardaki verilerle aynı değerlere sahip veri üretimidir.

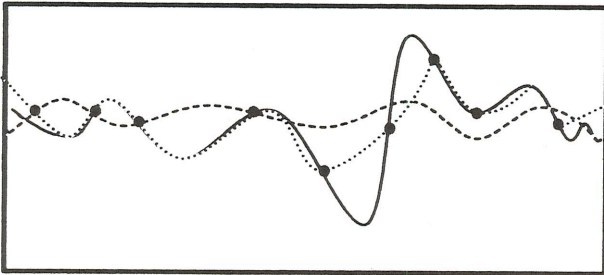
Simüle edilmiş bir maden yatağının göstereceği özellikleri aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

i) Gerçek verilerle aynı dağılıma sahiptirler (aynı histogram özelliği, eşit ortalama ve eşit varyans).

ii) Uzaklığa bağlı ilişki, gerçek verilerle aynıdır (aynı variogram özelliği).

iii) Örnekleştirilmiş lokasyonlarda gerçek değerlerle, simülasyon sonucu üretilen değerler tamamen eşit olacaktır.

Yukarıdaki özelliklerden 1. ve 2. maddeleri içeren teknik koşulsuz simülasyon, bütün özellikleri içeren simülasyon tekniği ise koşullu simülasyon olarak adlandırılır. Şekil 1' de koşullu ve koşulsuz simülasyon arasındaki fark gösterilmeye çalışılmıştır. Koşullu simülasyonda elde edilen sonuçlar, maden yatağında önceden örneklenip, gerçek değeri bilinen lokasyonlardaki sonuçlarla aynı değeri gösterirler. Yalnız, bu özelliğe dayanarak da, koşullu simülasyonun sadece veri ürettiğini söylemek yanlış olacaktır; örnekleştirilmiş lokasyonlarda gerçeğe yakın olası bir değer, örnekleştirilmiş lokasyonlarda ise gerçek değeri verdiği söylenebilir.



● Örnekleştirilmiş Gerçek Değer  
 — Gerçek  
 - - - - - Koşulsuz Simülasyon  
 ..... Koşullu Simülasyon

Şekil 1. Koşullu ve Koşulsuz Simülasyon

## 3. SİMÜLASYONUN MATEMATİKSEL İFADESİ

Maden yatağı MY simgesi ile gösterilirse, maden

yatağının her bir noktasındaki gerçek tenör değeri  $z_q(x)$   $\{x \in MY\}$  olacaktır. Bu noktaların kestirim ile elde edilen değerleri de  $z_k(x)$  ile gösterilebilir. Bu iki değer arasındaki fark, bilinmeyen bir kestirim hatasını verecektir.

$$\text{hata} = z_g(x) - z_k(x)$$

Buradan

$$z_g(x) = z_k(x) - \text{hata}$$

$$z_g(x) = z_k(x) - [z_g(x) - z_k(x)] \dots \dots \dots (1)$$

elde edilir.

Kestirim hatası, koşullu simülasyon teorisine anahar olabilecek bir özelliğe sahiptir. Arzu edilen koşullu simülasyon, (1) nolu eşitlikteki bilinmeyen kestirim hatasını, aynı dağılımsal özelliklere sahip ve bağımsız kestirim hatası olan  $[z_s(x) - z_{sk}(x)]$  ile yer değiştirerek bulunur.

$$z_{ks}(x) = z_k(x) + [z_s(x) - z_{sk}(x)]$$

Burada  $z_{ks}(x)$ , x noktasındaki koşullu simülasyon değerini,  $z_s(x)$  aynı noktadaki koşulsuz simülasyon değerini ve  $z_{sk}(x)$  ise yalnız koşulsuz simülasyon değerleri kullanılarak kestirilen, kestirim değerlerini göstermektedir.

Çeşitli yöntemler aracılığı ile yukarıdaki koşullu simülasyon eşitliğini kullanmamız mümkündür, yaygın olarak kullanılan simülasyon yöntemleri arasında: dönen bantlar metodu (Journel and Huijbregts, 1978), çok boyutlu spektral yöntemler (Mantoglou, 1987) kovaryans matrisi dekompozisyonu yöntemi (Davis, 1987), matrislerin halka dekompozisyonu yöntemi (Saraç and Dowd, 1993) ve Neural Networklere bağlı simülasyon yöntemi (Dowd and Saraç, 1993) örnek olarak verilebilir.

## 4. SİMÜLASYON VE KRİGİNG KESTİRİM TEKNİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

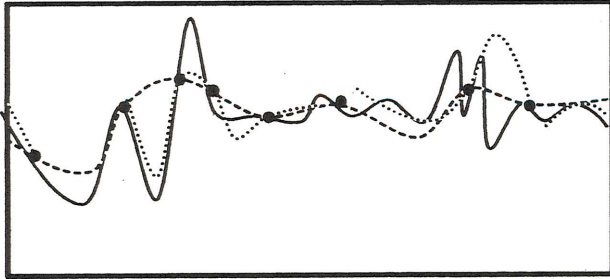
Bir maden yatağında, simülasyonla istenilen bütün lokasyonlardaki değerleri belirlemek mümkündür. Bu durumda "jeostatistiksel olarak birçok kriging kestirim yöntemi varken, simülasyonu kullanmanın avantajı nedir ya da kriging kestirimi ile simülasyon arasında ne gibi bir fark vardır" şeklinde bir soru sorulabilir.

Buna verilebilecek en iyi yanıt aşağıdaki şekilde özetlenebilir: Kriging kestirim teknikleri ve simülasyonun değişik amaçları vardır. Her ikisinde amaçları farklıdır. Jeostatistiksel kriging kestirim yöntemlerinin amacı, maden yataklarında istenilen her lokasyonda tenör değerini kestirmektir, yani bilinmeyen gerçek tenör

değerlerine en yakın değerleri saptarlar. Böyle bir kestirimin doğruluğu da karesel hata, yansızlık ve kestirim varyansı gibi parametrelerle ölçülebilir.

Simüle edilmiş bir maden yatağında ise, üretilen değerler, mevcut verilerle aynı variogram ve istatistiksel dağılım özelliklerine sahiptir.

Şekil 2' de simülasyonla, kriging tekniklerinin arasındaki fark gösterilmiştir. Devamlı eğriyle, maden yatağındaki gerçek tenör dağılımı şematize edilmiştir. Noktalar ise örnek aldığımız lokasyonlardaki tenör değerlerini temsil etmektedir. Kesikli eğriyle gösterilen kriging kestirim dağılımı, örnek alınan lokasyonlardaki tenör değerlerine uymasına rağmen, gerçek dağılımı yansıtmamaktadır. Bunun yanı sıra, noktalı eğri ile gösterilen simülasyon eğrisi, gerçeğe daha yakın bir dağılım göstermektedir. Anımsanması gereken bir önemli nokta da, pratikte gerçek tenör dağılımının sadece, örnek alınan noktalarda bilinmesidir.



● Örneklemiş Gerçek Değer  
— Gerçek  
- - - Kriging  
..... Koşullu Simülasyon

Şekil 2. Kriging ve Koşullu Simülasyon

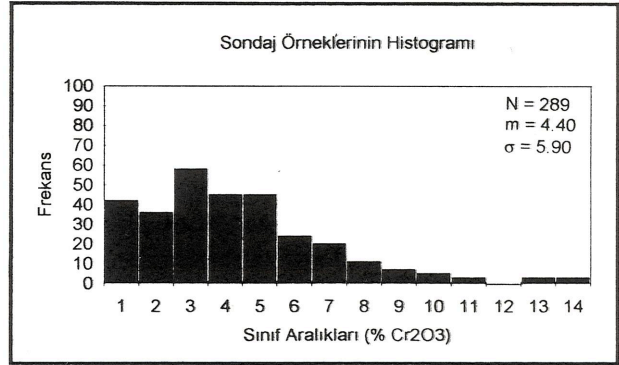
## 5. UYGULAMA

Adana ili, Karsantı ilçesi, Darılık köyünün 2.5 km. kuzey batısında yer alan Karsantı krom cevherleşmesi, Pozantı-Karsantı ofiyolitik kompleksi içinde, kümülat dünitlerin en üst seviyesini oluşturur (Akın, 1987). Cevherleşme de MTA tarafından yapılmış olan 26 adet sondajın toplam uzunluğu 4772 metredir. Ortalama olarak sondajlar 160 metre derinliktedirler. Sondajlardan alınan örnekler % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % MgO, % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve % SiO<sub>2</sub> içeriği açısından analiz edilmişlerdir. Bu çalışmada yalnız Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> incelenmiştir.

Birinci adımda sondajlardan alınan örneklerin boyları eşitlenerek yani kompozit edilerek, 289 eş uzunluklu örnek elde edilmiştir. Örneklerin uzunluklarını eşitleme de dikkat edilen en önemli unsur ortalama kare uzunluğudur.

## Jeoloji Mühendisliği

289 örneğin tenör değerleri, pozitif yönlü bir dağılım göstermektedir (Şekil 3). Bu dağılım % 4.40 ortalama, % 2.43 standart sapmaya ve 0.55 değişim katsayısına sahiptir.



Şekil 3. Sondaj Örneklerinin Histogramu

Cevherleşmenin 3 temel yönünde variogramlar hesaplanarak, cevherleşme uzaklığa bağlı olarak modellenmiştir. Elde edilen variogramlar genel olarak % 5.5 tepe değeri (sill) göstermektedirler. Yığılım varyansı (nugget variance) ise % 2.5 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4).

Elde edilen variogramlara küresel tip bir model uygulanmıştır (Journel and Huijbregts, 1978):

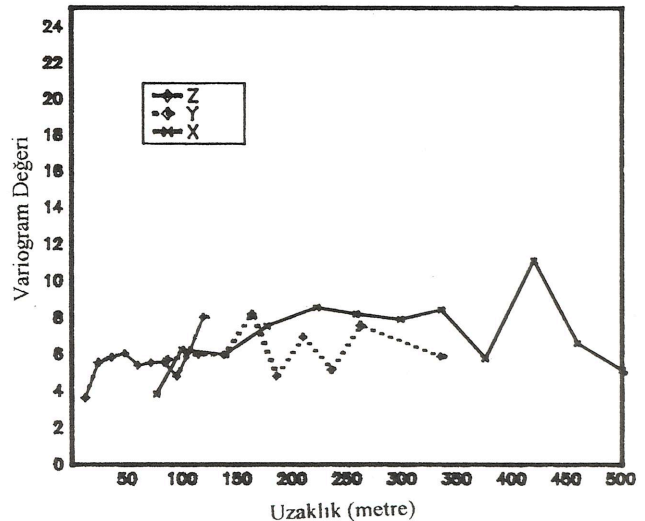
$$\gamma(h) = C_0 + C(1.5h/a - 0.5h^3/a^3) \quad h \leq a \text{ olduğu durumlarda}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a \text{ olduğu durumlarda}$$

$$\gamma(h) = 0 \quad h = a \text{ olduğu durumlarda}$$

Model parametreleri ise:

### CEVHERLEŞMENİN YÖNSEL VARIOGRAMLARI



Şekil 4. Cevherleşmenin Yönsel Variogramları

$$C_0 = 2.5$$

$$C = 3.0$$

x eksenindeki uzunluk=120 m.

y eksenindeki uzunluk= 120 m.

z eksenindeki uzunluk=30 m. olarak hesaplanmıştır.

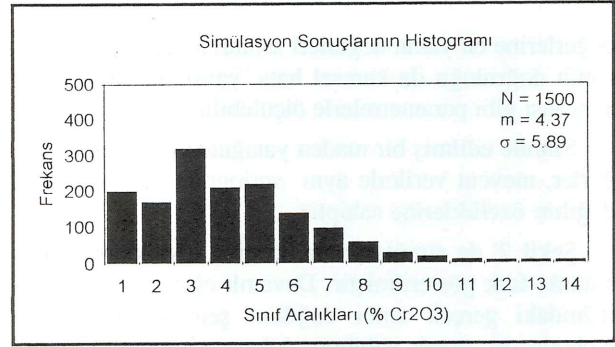
Uyarlanan bu model parametreleri, modelin geçerliliğini kanıtlamak açısından geri kestirim (back kriging) yöntemiyle de incelenmiştir. Geçerli bir model de, tenör değerleri üzerindeki doğrusal regresyon  $45^\circ$  ye yakın olmalıdır. Yani orijindeki kesişim 0 değerine yaklaşmalı, eğim ise yaklaşık 1 olmalıdır. Ortalama kestirim hatası varyansı ile, kestirim varyansı da yaklaşık olarak eşit olmalıdır (Saraç and Tercan, 1992). Kullanılan model parametrelerinin geçerliliğine ait sonuçlar Çizelge 1' de özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge1. Kullanılan Modelin Geçerliliği

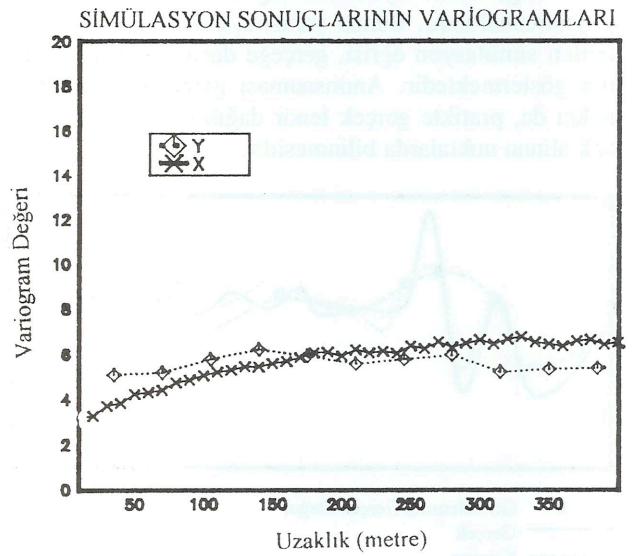
Mutlak Farklılık	1.62
Farklılık	0.00
Ortalama Kestirim Hatası Varyansı	6.42
Kestirim Varyansı	6.20
Orijindeki Kesişim	0.12
Eğim	0.97

Cevherleşmenin koşullu simülasyonu halka dekompozisyonu yöntemi ile yapılmıştır. Cevherleşmenin 1100 metre katı için 100 m. kat kalınlığında yapılan simülasyonda grid boyları, cevherleşmenin x eksenini boyunca 10 m., y eksenini boyunca da 35 m. olarak alınarak, x yönünde 50, y yönünde ise 30 blok için simülasyon gerçekleştirilmiştir. Buna göre her biri  $35.000 \text{ m}^3$  hacmi olan, toplam 1500 bloğun tenörleri simülasyonla hesaplanmıştır. Sonuçları koşullandırma da, sondajlardan elde edilen bütün veriler kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarının histogramı ve variogramları (Şekil 5 ve 6), sondajlardan elde edilen 289 örneğin gösterdiği histogram ve variogramlarla tamamen aynı özelliktedir.

Şekil 7' de cevherleşmenin 1100 metre katı için hazırlanan tenör-blok haritası sunulmaktadır.



Şekil 5. Simülasyon Sonuçlarının Histogramu

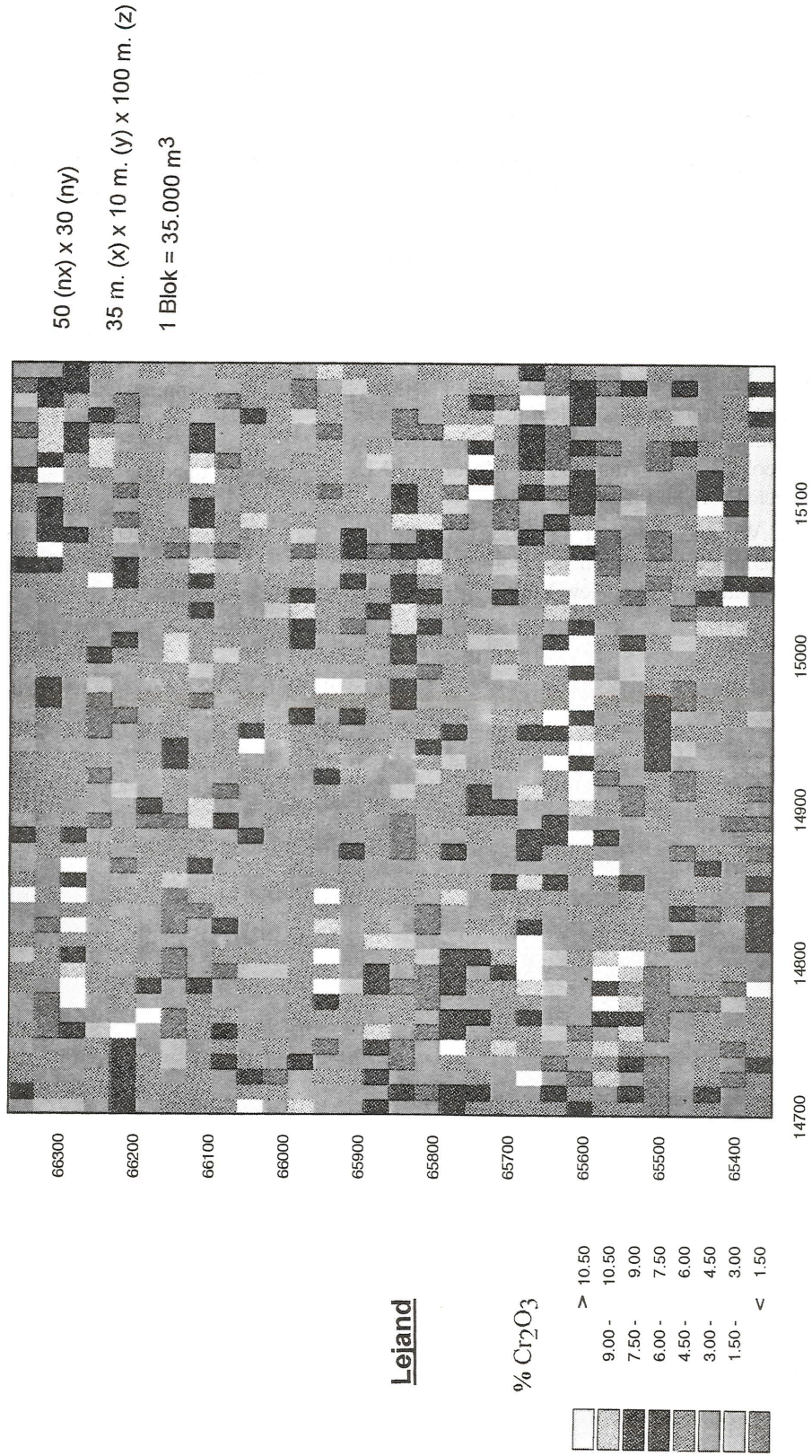


Şekil 6. Simülasyon Sonuçlarının Variogramı.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada jeoistatistiksel simülasyon yöntemlerinin maden yataklarının değerlendirilmesi açısından önemi gösterilmeye çalışılmıştır. Jeoistatistiksel simülasyon, özellikle son yıllarda, yerbilimlerinde etkin bir yöntem olarak kullanılmaya başlamıştır. Araştırmada, simülasyon genel olarak tanıtıldıktan sonra, sırası ile koşullu ve koşulsuz simülasyon teknikleri, simülasyonun matematiksel ifadesi, kriging teknikleri ile arasındaki fark verilmektedir. Uygulama olarak da, bir krom cevherleşmesinde örnek bir kat seçilerek, halka dekompozisyonu yöntemi ile koşullu simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve seçilen kat için hazırlanan tenör blok haritası sunulmuştur.

1100 metre KATI İÇİN SIMÜLASYONLA ÜRETİLEN BLOK-TENÖR HARİTASI



Şekil 7. 1100m. Katı Blok - Tenör Haritası

**KAYNAKLAR**

- Akın, A.K. (1987) Kızılyüksek - Yataardıç (Karsantı/Adana) ÖİR 634 nolu Sahanın Maden Jeolojisi Raporu, MTA Genel Müdürlüğü, Rapor no: 2252.
- Davis, M. (1987) Production of Conditional Simulations via the LU Triangular Decomposition of the covariance Matrix, Journal of Mathematical Geology, Vol. 19, No 2, pp 91-98.
- Dowd, P.A. and Saraç, C. (1993) Geostatistical Simulation Based on Neural Networks , The International Association for Mathematical Geology, 25<sup>th</sup> Anniversary Meeting, 10-15 October 1993, Prague.
- Harbaugh, J.W. and Bonham - Carter, G. (1970) Computer Simulation in Geology, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Journel, A.G. And Huijbregts, Ch.J. (1978) Mining Geostatistics, Academic Press, New York.
- Mantoglou, A. (1987) Digital Simulation of Two-and Three-Dimensional Stochastic Processes with a Spectral Turning Bands Method, Journal of Mathematical Geology, Vol. 19, No 2, pp. 129-150.
- Saraç, C. and Tercan, E. (1992) A Geostatistical Case Study of Kızılyüksek-Yataardıç Chromium Orebody, Geosound-Yerbilimleri, No 20, pp. 219-230.
- Saraç, C. and Dowd, P.A. (1993) A Modified Approach to Large Scale Geostatistical Simulation via the LU Decomposition Method, Leeds University Mining Association Journal, pp. 95-102.