

SİVAS ALTIN YATAĞINA KRIGING UYGULAMASI *

Implementation of Kriging to Sivas Gold Deposit

Ayten ESER
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Suphi URAL
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada Evliya Tepe (Sivas) altın yatağının altın rezervinin ve tenörlerinin kriging yöntemiyle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Veri tabanı oluşturmak için sahada önceden yapılmış jeolojik ve kimyasal analiz çalışmaları derlenmiştir. Sondaj verileri 4 m aralıklı kompozitlere dönüştürülerek jeostatistik analize hazır hale getirilmiştir. Kriging tahmini için tenör verilerinin variogram analizi yapılmış herhangi bir anizotropiye rastlanmamıştır. Oluşturulan variogram modellerinin uygunluğu ve yeterliliği çapraz doğrulama metodu ile test edilmiştir. Ordinary Kriging ile blok model içerisinde altın tahmini yapılmıştır. Belirli sınır tenör (cut-off) aralıklarında rezerv ve tenör hesaplanmıştır. Gerçek ve tahmin edilmiş verilerin istatistikleri karşılaştırılarak, tahminler doğrulanmıştır. Ordinary Kriging uygulaması sonunda, cevher dağılımının geometrik pozisyonları üç boyutlu ve iki boyutlu haritalar ile temsil edilmiştir

Anahtar Kelimeler : Jeostatistik, Ordinary Kriging, Altın

ABSTRACT

In this study, Evliya Tepe (Sivas) gold reserves of gold deposits are estimated by kriging method. To create a a database, previous geological and chemical analyses are compiled. As a result of gold data analyses, drilling data is brought to be ready for geostatistic analyze by converting into 4 m spaced composites. Variogram analyse of grade data is made for Kriging estimation and no anisotropy is seen. Appropriateness and adequacy of the variogram models were tested by cross-validation. Gold grade is estimated in the block model by Ordinary Kriging. Reserve and grade are calculated in certain range of cut-off grade. By comparing statistics of real and estimated data, predictions are confirmed. At the end of Ordinary Kriging application, geometric positions of ore distribution are represented by three and two dimensional maps.

Key Words : Geostatistics, Ordinary Kriging, Gold,

Giriş

Ülkemizde altın madenciliği oldukça yeni olup, son 10 yılda büyük gelişme göstermiştir. Ülkemiz altın yatakları rezerv ve tenör açısından dünyada önemli bir yere sahiptir. Yabancı ve yerli firmalar tarafından ülkemizdeki altın yataklarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Özellikle cevherleşmesi tabakalı olmayan

* Aynı başlıklı Doktora tezinden üretilmiştir.

yataklarda, belirli hacimlerin ortalama tenör veya araştırılan değişkenlerinin matematiksel hesaplamalarının, hassas sonuçlar vermesi beklenmemelidir. Tam bu noktada, jeolojik belirsizlikleri ve hesaplamadaki hata oranlarını da ortaya çıkaran jeostatistik yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. İlk dönemlerde, karmaşık hesaplamalar ve yorumlanması zor çıktılar ürettiği düşünülen bu yöntem; günümüzde gelişmiş bilgisayar yazılımları ile kolayca sonuç üreten ve en çok tercih edilen yöntemler haline almıştır. Jeostatistik yöntemler, güçlü yazılım desteği ve görsel sunuların anlaşılabilir olmasının yanı sıra, hesaplama hatalarının ölçülebilmesi ve jeolojik değişimlerin istenen hassasiyette ortaya konması bakımından da avantajlı yöntemlerdir. Jeostatistik yaklaşımlarda, jeolojik özellikler başta olmak üzere maden yataklarına ait bir takım değişkenlerin (tenör, kalite, kalınlık ve jeokimyasal veriler), sayısal olarak modellenen, sistematik bir yerleşim gösterdiği farz edilmektedir. Yatağın özellikleri sayısal olarak modellenirken istatistik yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Böylelikle tahmindeki hatalar istatistik parametrelerle değerlendirilebilmekte ve/veya sınırlandırılabilir. Bu yöntemlerle, maden yatağının geometrik yapısı ve tenör, kalınlık, kalite ve daha pek çok özelliği modellenmektedir.

Çalışmaya konu olan sahada Au-Ag başta olmak üzere bakır-kurşun-çinko cevherleşmesi bulunmaktadır. Cevherleşme şekli stockwork olan yatakta klasik teknikler tercih edilmemesi gereken yöntemlerdir. Nitekim bu tür yataklardaki bölgesel değişimler, istatistik yöntemlerle modellenebilecek komplike özellikler sergilemektedir. Dünyada altın yatakları için jeostatistik yaklaşımlarla yapılan tahmin çalışmaları kabul görmektedir. Bu çalışma; altın yataklarının; üretim ve işletme planlamaları için gerekli rezerv ve tenör modellenmesinde jeostatistik yöntemlerin uygulanmasını ele almaktadır. Uygulamada tahmin için kriging tekniği kullanılmıştır. Çalışma, dünyada, gerek akademik gerekse madencilik sektöründe önemli sayıda kullanıcısı olan DATAMINE madencilik yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür araştırmasına göre altın yataklarının rezerv, tenör analizleri, yer altı modellemeleri, yatağın 3 boyutlu modellenmesi için kriging uygulamaları çok sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışma ülkemiz altın yatakları için örnek ve başvurulan bir araştırma olması beklenmektedir.

Materyal ve Metot

Çalışma Sahası ve Sondaj Verileri

Türkiye'nin Kuzeydoğusunda, Karadeniz bölgesinde, Doğu Pontidler sıra dağları üzerinde yer alan çalışma sahasının, başkent Ankara'ya olan uzaklığı 445 km'dir (Figure 1). Çalışma sahası Türkiye'nin Kuzeydoğusunun lito-tektonik bölümündeki Doğu Pontidlerinde yer alır.

Bölge jeolojisi; yoğun altere olmuş volkanik ve derinlik kayaçları ile birlikte hidrotermal breşleşme ve silisleşme zonları hakimdir. Bu altere volkanik birimler ve breşler, altın ve bakır mineralizasyonu için önemli seviyelere işaret ederler. Bölgedeki alterasyon ve jeokimyasal sistem, yüksek sülfidasyon altın madeni zenginleşmeleri için uygun bir ortam sağlamaktadır. Altın yatağı, pek çok açıdan Filipinlerdeki Leponto yatağına benzerlik gösteren, iyi korunmuş yüksek

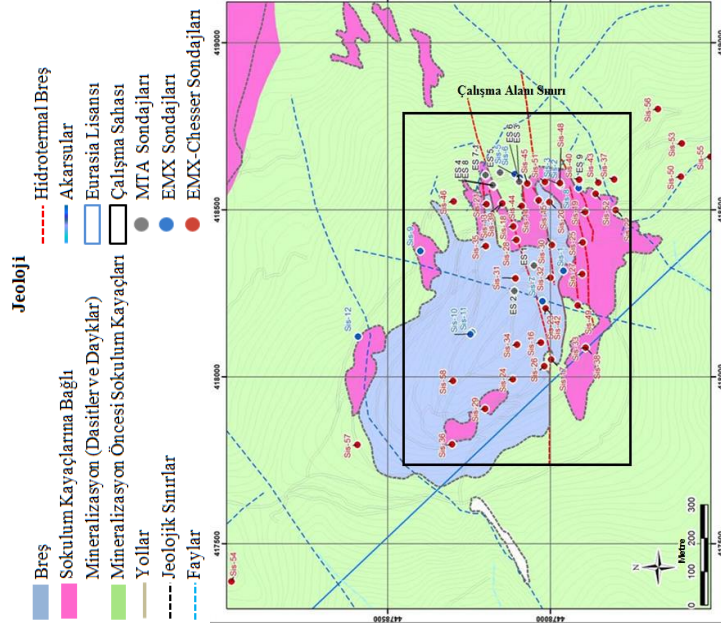
sülfidasyonlu epitermal (HSE) alterasyon ve mineralizasyon sistemini barındırmaktadır (Hedenquist ve White, 2005).



Şekil 1. Çalışma sahası yer bulduru haritası

Evliya Tepe'deki alterasyon, yüksek sülfidasyonlu, iyi korunmuş tipik bir epitermal sistemi karakterize etmektedir (Vigar ve ark., 2009). Çalışma alanı içerisinde birincil ve ikincil olarak oluşmuş altın, pirit, enarjit-luzonit grubu mineraller, titan grubu mineraller, hematit, limonit, sfalerit, galenit, kalkopirit, fahlerz, kalkozin, kovellin gibi cevher mineralleri gözlenmektedir. Gang mineralleri olarak kuvars, kalsit, barit, kil grubu mineraller, klorit izlenmektedir (Çakır ve Kesgin, 1999).

Çalışmada kullanılan sondaj bilgileri, sahada daha önce gerçekleştirilmiş jeolojik çalışmalar ve etütlerden derlenmiştir. 59 sondaj noktasından elde edilen 6715 adet verisi; koordinat (X, Y, Z), kalınlık bilgilerinin yanı sıra cevher tenör ve litoloji bilgilerini içermektedir. Çalışma alanı sınırı içerisine düşen sondajların dağılımı Şekil 2'de gösterilmiştir (Vigar ve ark., 2009).



Şekil 2. Sondaj lokasyonlarını gösteren jeolojik harita (Vigar ve ark., 2009)

Metot

Jeostatistik Analiz

Tahmin işlemi, yakın örneklerin arasındaki ilişkinin bir derecesi olarak ortaya çıkan ağırlıkların, tahmin yapılacak noktalara atanması ile gerçekleştirilmektedir. Noktalar arasında kriging gibi bir enterpolasyon yapılmadan önce, bir variogram modeli tanımlanmalıdır. Yapılandırılmış bir variogram modeline dahil edilecek temel adımlar; deneysel bir yarıvariogram (bundan sonra deneysel variogram olarak anılacaktır) oluşturmak ve bu variograma uydurulmuş bir variogram modeli kurmaktır. Variogram analizi, temelde her örneklem çifti arasında belirlenen mesafeye bağlı olarak hesaplanan yarı variogram değerlerinin, yine mesafeye karşı konumlandırıldığı bir grafikdir.

Kriging sonuçları tahmin edilecek değişkenin otokorelasyon modeline bağlıdır. Bundan dolayı yarıvariogram modelleme süreci ve yüksek kalitede bir model ihtiyacı büyük önem taşımaktadır. Pratik bir yaklaşımla kriging yapılandırılmış bir dizi aşamayı içermektedir. Bunlar; yarıvariogram modelinin çapraz doğrulaması, özgün bir blok tahmini için veri seçme kriterlerinin belirlenmesi, kriging yapılacak her blok için verideki minimum ve maksimum değerlerin tanımlanması, veri kullanımının sınırlandırılması ve en sonunda tahmin edilecek dizi içindeki her bloğun kriging sistematığının kurulması şeklindedir (Sinclair ve Blackwell, 2004).

Çalışmada çapraz doğrulama testleri ordinary kriging için uygulanmıştır. Test sonucunda seçilen yöntem ve parametreler ile rezerv ve tenör tahmini yapılmıştır.

Yapılan tahmin istatistik parametrelerinin ve grafiklerinin karşılaştırılması ile doğrulanmıştır. Tahmin sonucunda belirli sınır değerler kullanılarak metal içerikleri, sınır değer üzerinde kalan tenörlerin ortalamaları ve tonajları da hesaplanmıştır. Ordinary Kriging yöntemi aşağıda özetle tanımlanmıştır.

Olağan (Ordinary) Kriging: Tüm kriging tekniklerinde olduğu gibi en iyi tahmine ulaşmak için tahmin varyansını minimize etmeye çalışır. Bir noktanın veya bloğun tahmini; kabaca uzaklığa göre ağırlıklı ortalamanın bulunması ile gerçekleşmektedir. Bunun için tanımlanmış sınırlar içerisinde kalan tüm bilinen verilerin uzaklığa göre ağırlıkları belirlenir ve ağırlıklandırılmış verilerin toplamı o noktaya değer olarak atanır (Deutsch ve Journel, 1998; Coombes, 2008).

Araştırma Bulguları

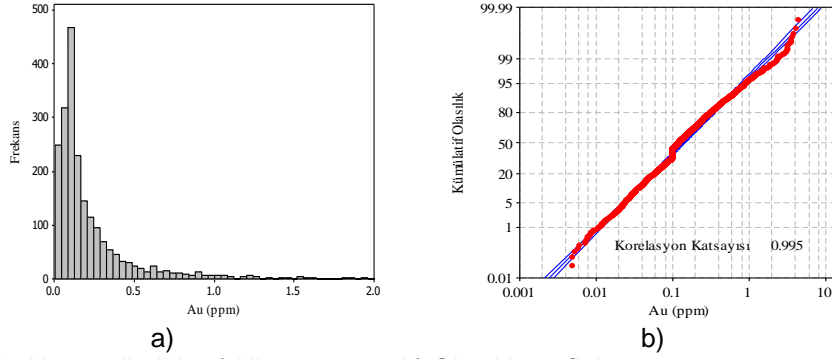
Veri

Tahmin işlemi 4 m'lik kompozit verileri üzerinden gerçekleştirilmiş olup, söz konusu verilerin özet istatistiğine bakıldığında (Çizelge 1) medyan ve ortalama değerlerinin birbirine yakın olmaması, çarpıklık ve sivrilik yüksek değerlerde veri setinin aşırı sağa çarpık (pozitif çarpık) bir dağılıma işaret etmektedir. Histogram grafikleri incelendiğinde göze çarpan sağa çarpık dağılım, verinin özet istatistiklerini doğrulamaktadır (3a). Probabilite (olasılık) grafiklerinin X eksenini logaritmik ölçek, Y eksenini ise probabilitenin (olasılık) ölçeğinden oluşturulmuştur. Örneğin altının kompozit analizi neticesinde hazırlanan olasılık grafiğinde numunelerin %50'sinin tenörü 0.1 ppm'in altındadır. Aynı şekilde verilerin %95'i ise 1 ppm'in altındadır (Şekil 3b).

Çizelge1. Veri istatistikleri

	Kompozit Verileri
Veri Sayısı	2111
Minimum	0.005
Maksimum	4.54
Aritmetik Ortalama	0.26
Medyan	0.12
Standart Sapma	0.43
Varyans	0.19
Değişim Katsayısı	1.65
Çarpıklık	4.69
Sivrilik	28.24
Alt Çeyrek	0.07
Üst Çeyrek	0.26

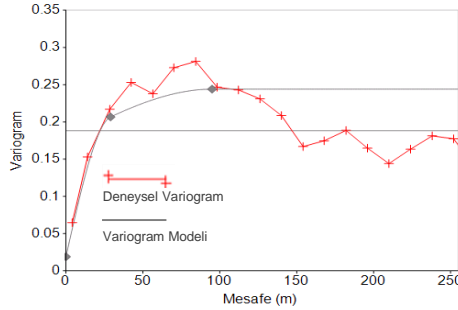
Verilerin lognormal diyagonal eğri ile olan uyumu oldukça iyidir. Verinin diyagonal eğri ile olan korelasyon katsayısı 0.995'dir(Şekil 3b). Sonuç olarak hem histogram hem de olasılık grafiklerinden görüldüğü gibi tüm değişkenlerde asimetric pozitif bir dağılım, çok aşırı sağa sapma sergilediği ve dolayısıyla değişkenlerin kompozit verilerinin normal dağılıma uymadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Altın verilerinin a) Histogram ve b) Olasılık grafiği

Variogram Analizi

Çalışmada çeşitli lag mesafeleri denenerek çok sayıda variogramlar hesaplanmıştır. Tanımlanan Lag mesafesi 14 m olup, tanımlanan her yön için 40 adet Lag kullanılmıştır. Altın verisi için yapılacak tahminde kullanılacak parametreler için dört yönde (0° , 45° , 90° ve 135°) ve yönsüz teorik variogramlar hazırlanmıştır. Hazırlanan yönlü variogramlar arasında anizotropiye rastlanmamış, yönsüz olanına iki yapılu izotropik küresel model uydurulmuş olup, model Şekil 4'de verilmiştir. Küresel variogram modeline ait model parametreleri Çizelge 2'de sunulmuştur.



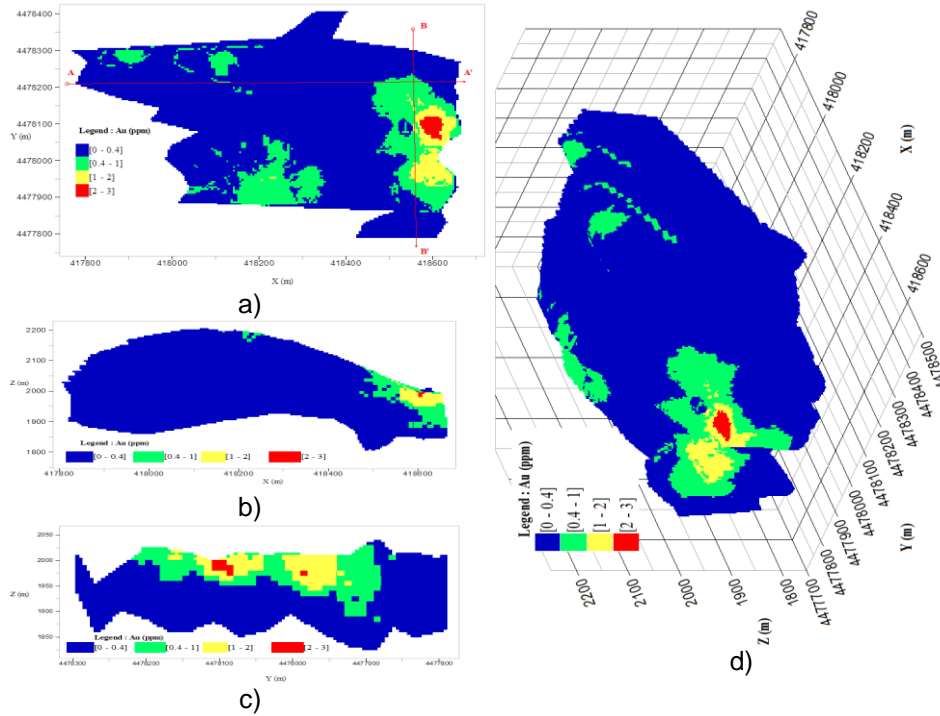
Şekil 4. Au deneysel variogram ve teorik variogram modeli

Çizelge 2. Altın küresel variogram modellerine ait parametreler

Kontrolsuz Etki (Nugget)	Yapı	Etki Mesafesi (Range)	Yapısal Varyans (C)	Yapısal Etki (C_0+C)
0.019	1	29	0.158	0.177
	2	95	0.067	0.244

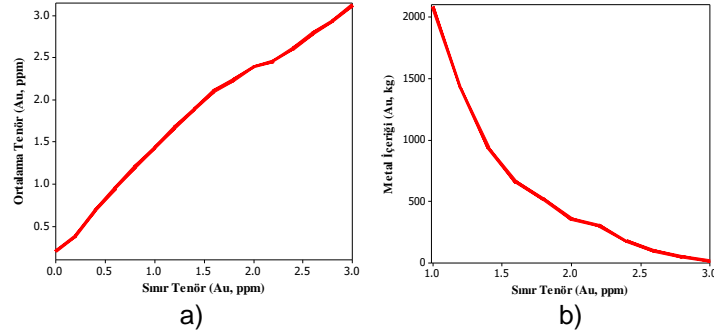
Ordinary Kriging Yöntemiyle Altının Rezerv ve Tenör Tahmini

Rezerv hesabında tüm saha için yoğunluk 2.50 t/m^3 olarak kullanılmıştır. Oluşturulan tahmin modeline ait plan ve üç boyutlu görünüşleri Şekil 5a ve 5b'de verilmiştir. Çalışmaya konu olan saha da işletme sınır tenör olarak 0.4 ppm seçilmiştir. Saha genel olarak incelendiğinde sınır tenör üzerinde bir cevherleşme söz konusudur. Şekil 5a üzerinde belirlenen doğrultularda kesitler alınarak, bölgesel değişim gözlenmiştir. AA' ve BB' kesitleri sırasıyla Şekil 5c ve 5d'de verilmiştir. Sahanın doğu kesiminde belirgin bir şekilde tenör değişimi fark edilmiştir. D-B yönünde alınan AA' kesiti yaklaşık 1 ppm tenörlü bölgesel bir cevherleşme sunmaktadır (Şekil 5b). Birkaç blok ile sınırlanan $2-3 \text{ ppm}$ aralığındaki cevherleşme, küçük bir alanda izlenmektedir. K-G yönündeki BB' kesitinde ise yüzeye yakın oksidasyon zonu içerisinde kalan bölümde nispeten yüksek konsantrasyonlu altın varlığına işaret etmektedir. Kesit alanının yaklaşık %5'lik kısmında ise 3 ppm 'e ulaşan bir altın cevherleşmesi söz konusudur (Şekil 5c).



Şekil 5. Au tahmini a) Plan, b) AA' kesiti, c) BB' kesiti, d) Üç boyutlu haritası

Altın için hazırlanan rezerv ve tenör eğrileri Şekil 6a ve 6b'de, ayrıca modele ait rezerv ve tenör değerlerinin belirli sınır değerlere göre miktarları Çizelge 3'de verilmiştir.



Şekil 6. Altın tahmini a)Ortalama tenör-sınır tenör, b)Tenör-tonaj

İşletme sınır tenörü 0.4 ppm olarak tespit edilmiştir. Çizelgeden; işletme sınır tenör değerinin üzerinde kalan rezerv 9,425,625 ton olup, bu sınırdaki kazanılacak toplam altın miktarı 6484.8 kg olarak hesaplanmıştır. Yapılan tahmine göre, saha belirlenen bloklarda üretim yapılırsa, sınır tenörün üzerinde kalan ortalama tenör 0.688 ppm olacaktır.

Çizelge 3. Au rezerv ve tenör tahmin sonuçları

Sınır Tenör (ppm)	Sınır Tenör Üzerindeki Toplam Rezerv (ton)	Sınır Tenör Üzerinde Kalan toplam Rezervin Ortalama Tenörü (ppm)	Sınır Tenör Üzerindeki Metal İçeriği (kg)
0.00	134361620	0.198	26603.6
0.20	45995072	0.386	17754.1
0.40	9425625	0.688	6484.8
0.60	4375938	0.950	4157.1
0.80	1764063	1.201	2118.6
1.00	1145000	1.429	1636.2
1.20	539063	1.670	900.2
1.40	345938	1.887	652.8
1.60	162500	2.104	341.9
1.80	165313	2.237	369.8
2.00	83125	2.392	198.8
2.20	105313	2.461	259.2
2.40	49375	2.609	128.8
2.60	35313	2.791	98.6
2.80	17500	2.938	51.4
3.00	5000	3.125	15.6

Altın Tahmininin Doğrulanması

İyi bir tahminde, tahmin ortalaması ile orijinal verilerin ortalamasının birbirine yakın, tahmin verilerinin varyans, standart sapma ve değişim katsayısının orijinal verilerinkinden daha düşük olması beklenmektedir. Tahmin verilerinin özet istatistiği incelendiğinde, gerçek veriler ile tahmin edilmiş verilerin ortalamalarının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4). Çizelge 4'den, gerçek değerlerin ortalaması 0.263, tahmin değerlerinin ortalaması 0.198 olup, bu ortalamalar arasındaki değişim % 0.1 olduğu görülmüştür. Tahmin verilerinin varyans, standart sapma ve değişim katsayıları, gerçek verilerinkine kıyasla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda, tahmin istatistikleri inşa edilen modelin yeterliliğini ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4. Altının gerçek ve tahmin edilmiş değerlerinin istatistikleri

	Gerçek Değerler	Tahmin Edilmiş Değerler
Veri Sayısı	2111	80338
Minimum	0.005	0.008
Maksimum	4.539	3.127
Aritmetik Ortalama	0.263	0.198
Medyan	0.123	0.143
Standart Sapma	0.434	0.205
Varyans	0.188	0.042
Değişim Katsayısı	1.648	0.104
Çarpıklık	4.69	4.23
Sivrilik	28.24	30.35
Alt Çeyrek	0.074	0.083
Üst Çeyrek	0.264	0.246

Tartışma ve Sonuçlar

Sahada yapılmış jeolojik ve sondaj çalışmaları derlenmiştir. Sondaj koordinatları ve numune kalınlıkları ile bu kalınlıklardan elde edilen kimyasal analiz sonuçları birleştirilerek veri tabanı oluşturulmuştur. Jeolojik çalışmalar için dünyanın önde gelen üniversite ve ticari kurumsal şirketlerinde aktif olarak kullanılmakta olan DATAMINE yazılımı tercih edilmiştir. Au verileri için yarıvariogram analizleri yapılarak verilerin mesafeye karşı değişimi modellenmiştir. Veri grubunda anizotropiye rastlanmamış, verilerin yönsüz variogramlarına küresel modeller uydurulmuştur. Ordinary Kriging tekniği ve seçilen parametreler kullanılarak çalışma sahasında Au tahminleri yapılmıştır. Yoğunluk verisi yeterli bulunmadığından yoğunluk tahmini yapılmamış, sahada daha önce yapılmış çalışmalarda olduğu gibi yoğunluk 2.5 ton/m³ olarak kullanılmıştır. Yapılan tahminler haritalar ve kesitlerle iki ve üç boyutlu olarak incelenmiştir. Au tahminlerinde sahanın doğusunda K-G doğrultusu boyunca tenör yükselmeleri göze çarpmıştır. Altın verisi için rezerv ve tenör eğrileri oluşturulmuş, belirli sınır değerlerde, ortalama rezerv ve metal içeriği incelenmiştir. Belirlenen sınır tenörler

de rezerv ve metal içerikleri hesaplanmıştır. Altın için işletme sınır tenörü (0.4 pmm) üzerindeki toplam rezerv 9,425,625 ton, bu rezervin ortalama tenörü 0.688 ppm olarak bulunmuştur. Yapılan tahmine göre belirlenen sınır tenörler üzerindeki toplam rezervin üretilmesiyle; 6484.8 kg altın (metal içeriği) kazanılacaktır. Altın tahmin modeli doğrulanmıştır. Bu amaçla tahmin edilmiş verilerin özet istatistikleri hesaplanmıştır. Sayısal çıktılar orijinal verilerin çıktıları ile karşılaştırıldıklarında büyük oranda uyum göstermiş, tahmin modellerinin yeterliliği ve güvenilirliği kanıtlanmıştır.

Çalışma sonuçları sahanın Doğu bölümünde K-G yönelimli tenör yükselmesine işaret etmektedir. Buna istinaden, yeni arama çalışmalarında, sondaj lokasyonları Doğuya doğru ilerletilebilir. Sondaj çalışmaları sırasında cevher, tenör, yoğunluk, fay, boşluk, zon tanımlamaları eksiksiz yapılmalıdır. Böylelikle sahadaki cevher yapısı, fay sistemleri, yoğunluk tahmini, jeolojik model ve tahmin daha hassas yapılabilir. Örneklemelerdeki hassasiyet arttıkça tahmin ve modellemelerdeki doğruluk artacaktır. Yapılan işlemin doğru olabilmesi jeostatistiksel analizin güvenilirliğine, analizlerin güvenilirliği ise toplanan verilerin doğruluğuna bağlıdır. Elde edilecek sonuç işe başlarken gösterilecek dikkat ve özenle şekillendirilmelidir.

Kaynaklar

- Coombes, J., 2008. The Art and Science of Resource Estimation: A Practical Guide For Geologists and Engineers. Coombes Capability, 229 S.
- Çakır, M., Kesgin, O., 1999. Evliya Tepe (Ortakent – Koyulhisar – Sivas) Altın Yatağı Maden Jeolojisi Raporu. Mta Rapor No: 10217, Mta, Ankara (Yayınlanmamış).
- Datamine, 2009. Common Farm Lidlington Bedfordshire, U.K.
- Deutsch, C. V., Journel, A. G., 1998. Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York.
- Hedenquist, J., White, 2005. Epithermal Gold Deposits. Pdac, Short Course (Yayınlanmamış).
- Sinclair, A. J. And Blackwell, G. H., 2004. Applied Mineral Inventory Estimation. Cambridge University Press, United Kingdom, 381 S.
- Vıgar, A.J., Meldrum, S., Giroux, G. and Soylu, M., 2009. Technical Report on Exploration Results and Resource Estimates For the Sisorta Property Sivas Province, Turkey. by Mining Associates Pty. Limited for Chesser Resources Limited and Eurasian Minerals Inc. (Yayınlanmamış)