



Jeoistatistiksel modelleme yöntemi belirsizlik-hacim oranı kullanılarak volkanojenik masif sülfid yatağındaki bakır mineralizasyonunu denetleyen faktörlerin modellenmesi, Nohkouhi (Orta İran)

Uncertainty-volume fractal model for delineating copper mineralization controllers using geostatistical simulation in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide deposit, Central Iran

Saeid HAJSADEGHI^a, Omid ASGHARI^{b*}, Mirsaleh MIRMOHAMMADI^a, Peyman AFZAL^c
ve Seyed Ahmad MESHKANI^a

^aTahran Üniversitesi, Maden Mühendisliği Fakültesi, Tahran, İran

^bTahran Üniversitesi, Maden Mühendisliği Fakültesi, Simülasyon ve Veri İşleme Laboratuvarı, Tahran, İran

^cİslam Azad Üniversitesi, Güney Tahran Kampüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, Tahran, İran

Araştırma Makalesi

Anahtar Kelimeler:

Ardışık Gauss yöntemi, Sıralı gösterge modellemesi, Konsantrasyon hacimli oransal modelleme, Belirsiz hacimli fraktal modelleme, Volkanojenik masif sülfid, Nohkouhi bakır yatağı.

ÖZ

Bu çalışmanın amacı Nohkouhi volkanojenik masif sülfid (VMS) yatağındaki bakır mineralizasyonunu kontrol eden faktörleri jeostatistiksel ve oransal modelleme kullanarak tanımlamaktır. Bu çalışmada, farklı ana kayaç ve bakır mineralleri ile ilgili çeşitli bakır popülasyonlarını belirtmek için konsantrasyon-hacmi (K-H) oransal modeli kullanılmıştır. Buna göre, belirsizlik-hacim (B-H) oransal model, ardışık gösterge modellemesi (AGS) ile elde edilen olasılık değerlerine uygulanmıştır. Kalkopirit ve malakit içeren Nohkouhi yatağının bakır cevherleri 30 tekrarlı modellenmiştir. Bir olasılık haritası kullanılarak elde edilen B-H oransal modeli, bakır mineralleri için dört olasılık bölgesi (yüksek, orta, düşük ve çok düşük) oluşturmuştur. Ayrıca, bakır tenörleri ardışık Gauss yöntemi (SGS) ile 10 kez modellenmiştir. K-H ve B-H oransal modellemesinin birleşimi, nicel (örneğin, bakır sınıfı) ve nitel (örneğin, bakır mineralleri) değişkenler arasındaki ilişkiye dayanarak çeşitli mineralizasyon bölgelerini belirlemek için uygun şekilde kullanılabilir bir melez yöntemle sonuçlanmıştır. Ayrıca, K-H ve B-H modelleme sonuçlarının, bölgede en sık görülen kayaç tipi modellemesiyle bütünleştirilmesi, bir VMS yatağındaki bakır mineralizasyonunu denetleyen faktörlerin tespit edilmesine yardımcı olur.

Geliş Tarihi: 29.07.2018

Kabul Tarihi: 14.11.2018

Keywords:

Sequential Gaussian simulation, Sequential indicator simulation, Concentration-volume fractal modeling, Uncertainty-volume fractal modeling, Volcanogenic massive sulfide, Nohkouhi copper deposit.

ABSTRACT

The aim of this study was to delineate copper mineralization controllers in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit by using geostatistical and fractal simulation. In this study, concentration-volume (C-V) fractal model has been used to indicate various copper populations related to different host rocks and copper minerals. Accordingly, uncertainty-volume (U-V) fractal model was applied to probability values achieved through sequential indicator simulation (SIS). Copper ores of Nohkouhi deposit including chalcopyrite and malachite were simulated in 30 realizations. The U-V fractal model obtained by using a probability map was divided into four probability zones (high, moderate, low, and very low) for copper minerals. Furthermore, copper grades were simulated for 10 times by sequential Gaussian simulation (SGS). Combination of C-V and U-V fractal modeling resulted in a hybrid method which could be properly employed to determinate various mineralization zones based on the relationship between quantitative (e.g. copper grade) and qualitative (e.g. copper minerals) variables. Moreover, integrating the results of C-V and U-V fractal modeling with the most frequent occurrence of rock type modeling helps identify copper mineralization controllers in a VMS deposit.

Atf bilgisi: Hajsadeghi, S., Asghari, O., Mirmohammadi, M., Afzal, P., Meshkani, A. A. 2020. Uncertainty-volume fractal model for delineating copper mineralization controllers using geostatistical simulation in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide deposit, Central Iran. Bulletin of the Mineral Research and Exploration, 161, 1-12. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.495753>

* Başvurulacak yazar: Omid ASGHARİ, o.asghari@ut.ac.ir

1. Giriş

Mandelbrot (1983) tarafından sunulan oransal modeller, jeolojik ve cevherleşme süreçlerini açıklamak amacıyla birçok farklı durum için kullanılmıştır. Maden yatağı verilerinin mekansal bilgileri göz önüne alındığında, oransal modellemenin jeolojik, jeokimyasal ve mineralojik ortamlar arasındaki ilişkilerini ortaya çıkaran faydalı bir yöntem olduğu belirtilebilir (Goncalves vd., 2001; Carranza, 2009; Gumiel vd., 2010; Daneshvar Saein vd., 2012; Soltani vd., 2014; Afzal vd., 2016). En yaygın kullanılan oransal modeller, sayı-büyüklik (S-B: Mandelbrot, 1983; Sadeghi vd., 2012), konsantrasyon-alan (K-A: Cheng vd., 1994), spektrum-alan (S-A: Cheng vd., 1999), konsantrasyon-uzaklık (K-U: Li vd., 2003), konsantrasyon-hacim (K-H: Afzal vd., 2011), konsantrasyon-sayı (K-S: Hassanpour ve Afzal, 2013) ve modellenmiş boyut-sayı (SB-S: Sadeghi vd., 2015) verilerini içerir.

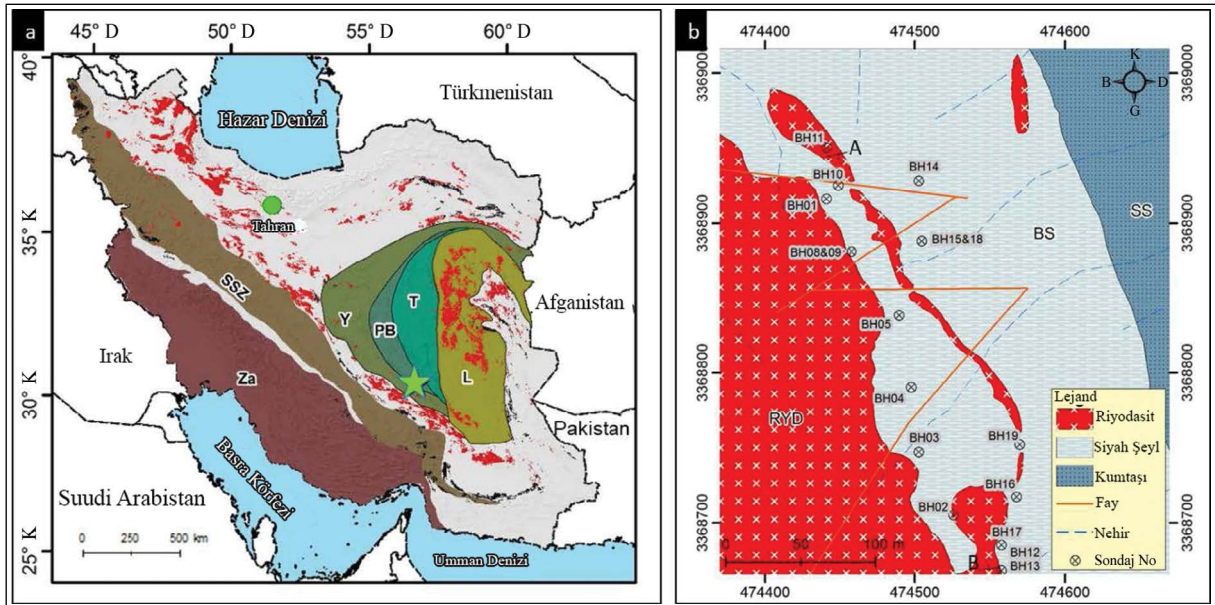
Konsantrasyon-hacim oransal modelleri, yaygın olarak porfiri yataklarda (Afzal vd., 2011; Yasrebi vd., 2013; Soltani vd., 2014; Sun ve Liu, 2014) ve daha az olarak da altın (Afzal vd., 2013; Lin vd., 2014), Zn-Pb MVT (Delavar vd., 2012) ve demir yatakları (Sadeghi vd., 2012; Afzal vd., 2015; Rahmati vd., 2015) gibi farklı yatak tiplerinde kullanılmıştır. Blok modellerdeki tenör dağılımı, sıradan Kriging, Çoklu-Gauss Kriging ve ardışık Gauss yöntemleri gibi

jeostatistiksel yöntemlerle üretilebilir. Jeostatistiksel modeller, tahmini yöntemlerin (Normal Kriging ve Basit Kriging gibi) düzleme etkisinin üstesinden gelmek için tasarlanmıştır (örn., Chilès ve Delfiner, 2009). Bu yöntemler sırasıyla, ardışık Gauss simülasyonu (örn., AGS; Deutsch ve Journel, 1998) ve sıralı gösterge simülasyonunun (örn., SGS; Journel, 1983) devamlı ve gösterge değişkenlerine uygulanır. Son zamanlarda, cevherleşme ve alterasyon gibi jeolojik olaylar, modelleme yöntemlerinin oransal modelleme ile birleştirilmesiyle etkili bir şekilde ayırt edilmektedir (Afzal vd., 2014; Soltani vd., 2014; Sadeghi vd., 2015).

Bu makalenin temel amacı VMS yataklarında bakır tenörünü, bakır cevher minerallerinin oluşma olasılığını ve ana kayaçla arasındaki ilişkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla, K-H oransal modeli, ardışık Gauss yönteminden üretilen Cu oluşum senaryolarına uygulanmıştır. Ayrıca, B-H oransal modeli, sıralı gösterge simülasyonu kullanarak Nohkouhi yatağının iki bakır mineralinde (kalkopirit ve malakit) farklı olasılık bölgelerini ayırt etmek için kullanılmıştır.

2. Yatağın Bölgesel Jeolojisi

Nohkouhi bakır yatağı, Orta İran mikrokitasının bir parçası olarak Posht-Badam bloğunda bulunmaktadır (Şekil 1a). Bu yatak, ölçülen ortalama tenörü %1 olan 1,5 Mt Cu cevheri içermektedir (Karmania, 2013).



Şekil 1- a) Nohkouhi yatağının İran'ın bölgesel jeoloji haritasındaki yeri (Yeşil yıldız; Sahandi vd., 2002'den basitleştirilmiştir), b) Nohkouhi yatağının jeolojisi. Kısaltmalar: SSZ = Sanandaj-Sirjan bölgesi, Za = Zagros, Y = Yazd bloğu, PB = Posht-e-Badam bloğu, T = Tabas bloğu, L = Lut bloğu.

Siyah şeyl ve riyodasit, bakır mineralleşmesinin ana kayaçlarıdır (Şekil 1b). Hajsadeghi vd. (2017)'nin yaptığı çalışmalara göre, üç aşamada bakır cevherleşmesi meydana gelmiştir. İlk olarak, pirit ve az miktarda kalkopirit, siyah şeyle eşzamanlı olarak depolanmıştır (Şekil 2a, b, c). İkinci aşama ise riyodasit sokulumları olup siyah şeyl içerisine yerleşmesi ile meydana gelmiştir. Hidrotermal sıvıların hareketi sonucu siyah şeyller bakırca zenginleşmiştir (Şekil 2d). Kalkopirit, özşekilli pirit, daha az oranda sfalerit ve galena ile yarı masif ve damar şeklinde oluşmuştur. Üçüncü aşamada, sülfür mineralleri oksitlenir ve malakit, limonit, götit, hematit ± azurit ± jips mineralleri oluşur.

3. Uygulanan Yöntemler

3.1. Konsantrasyon - Sayı Oransal Modeli

Konsantrasyon-sayı (K-S) oransal modeli, jeokimya veri tabanındaki jeokimyasal eşikdeğer ve anomaliyi ayırmak için kullanılan modellerden biridir (Mandelbort, 1983). Model (1) olarak tanımlanmıştır:

$$N(\geq\rho) \propto \rho^{-\alpha} \quad (1)$$

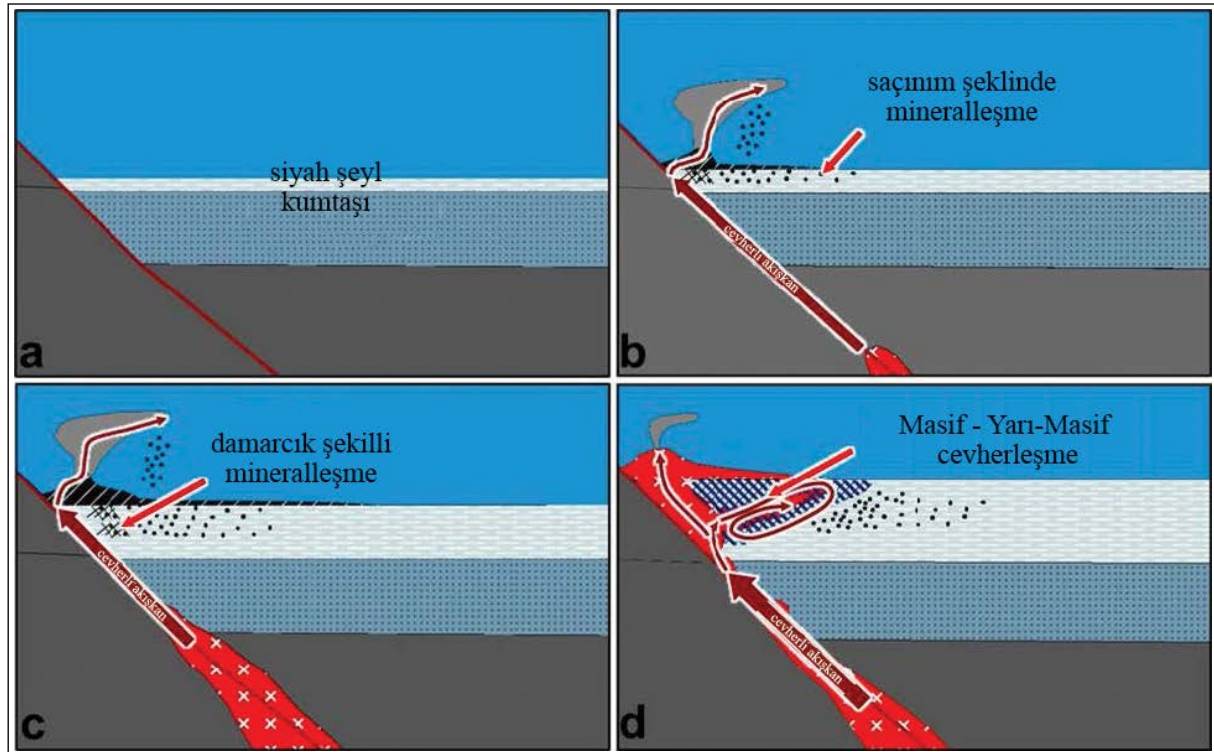
$N (\geq\rho)$, ρ değerinden büyük konsantrasyon değerine sahip örnek sayısını belirtir. ρ , element konsantrasyonu ve β , oransal boyuttur. Bu yöntemin temel avantajı, jeokimyasal popülasyonların tahmin edilme süreçlerinden önce sınıflandırılmasıdır (Sadeghi vd., 2012; Rezaei vd., 2015).

3.2. Konsantrasyon-Hacim (K-H) Oransal Modeli

K-H modeli, ilk kez Afzal vd. (2011) tarafından, farklı cevher yataklarında, cevherli ana kayaçların ayrılması için kullanılmıştır. K-H modelinde “K” nin “konsantrasyon” (örn. Dereceli veya tonaj) veya “olasılık” (örn. belirsizlik) ile değiştirilebileceği de eklenmelidir. Bu çalışmada, konsantrasyonu kısaca ifade etmek için “K” kullanılmıştır. K-H oransal modeli şöyle ifade edilebilir:

$$H (k \leq v) \propto k^{-a1}; H (k > v) \propto k^{-a2} \quad (2)$$

$H (k \leq v)$ ve $H (k > v)$ durumunda konsantrasyon değerinin (k) kontur değerinden (v) küçük veya büyük olması, hacmi (H) gösterir; $a1$ ve $a2$ karakteristik üslerdir.



Şekil 2- Nohkouhi yatağının oluşumunun en muhtemel jeodinamik oluşumunu gösteren şematik blok diagram (Hajsadeghi vd., 2017). a) Kumtaşı ve cevhersiz siyah şeyller depolanır, b- c) felsik magma yükselip yerleşirken, siyah şeyl ve pirit ± kalkopirit bakımından zengin, cevherleşmenin ilk aşamasında eş zamanlı olarak biriktirilmesi, d) bakır cevherleşmesi, magmatik akışkanın dolaşımı (ikinci aşama).

3.3. Ardışık Gauss Yöntemi

Ardışık Gauss yöntemi (AGS), sürekli değişkenlerin koşullu modellemesidir (Goovaerts, 1996; Chilès ve Delfiner, 2012). Bu algoritmada, veriler sıfır ortalama ve birim varyans ile Gauss dağılımına dönüştürülür. Bu yöntemde, koşullu veriler, en yakın karelej alanlarına taşınarak rakamsal veriler elde edilir. Diğer karelej alanları modellenir ve soyut veri olarak kabul edilir. Ardışık Gauss yönteminin aşamaları aşağıdaki gibidir:

- Temsili nokta, karelej alanından rastgele seçilir (1. rastgelelik);
- Temsili değer, sıfır gerçekleştirilmesinden hesaplanan aralıktan seçilir (2. rastgelelik);
- Her bir gerçekleştirmedeki son histogram ve dağılım, hem rakamsal hem de soyut verilerden hesaplanabilir:

$$Z_{SGS}^* = Z_{SK}^* \pm s_k(U) \quad (3)$$

Z_{SK}^* , basit kriging tahmininden hesaplanır; $s_k(U)$, kriging tahmininin standart sapmasını belirtir; (U) normal fonksiyondan rastgele bir değerdir ve Z_{AGS}^* temsili bir değerdir (Rossi ve Deutsch, 2013).

3.4. Sıralı Gösterge Simülasyonu

Sıralı gösterge simülasyonu (SGS), sınıflandırılmış değişkenler için uygulanmaktadır (Journel ve Isaaks, 1984). Gerçekleştirme aşağıdaki süreçlerle elde edilir:

- Temsili karelej noktaları üzerinden rastgele bir yol tanımlanır (hedef noktalar). Bu bölüm ayrıca veri noktalarını içerir;
- Koşullu kümülatif dağılım fonksiyonu (kkdf), Gösterge Kriging tarafından belirlenir;

- Tam bir kkdf modeli oluşturmak için sıralama bağıntısı düzeltilir;
- Düzeltilmiş kkdf'ndan bir simülasyon değeri yazılır;
- Temsili değer, koşullandırma veri kümesine eklenir;
- Rastgele yolda bulunan bir sonraki alana geçilir ve yukarıdaki adımlar tekrarlanır.

4. Deneysel Veri Seti

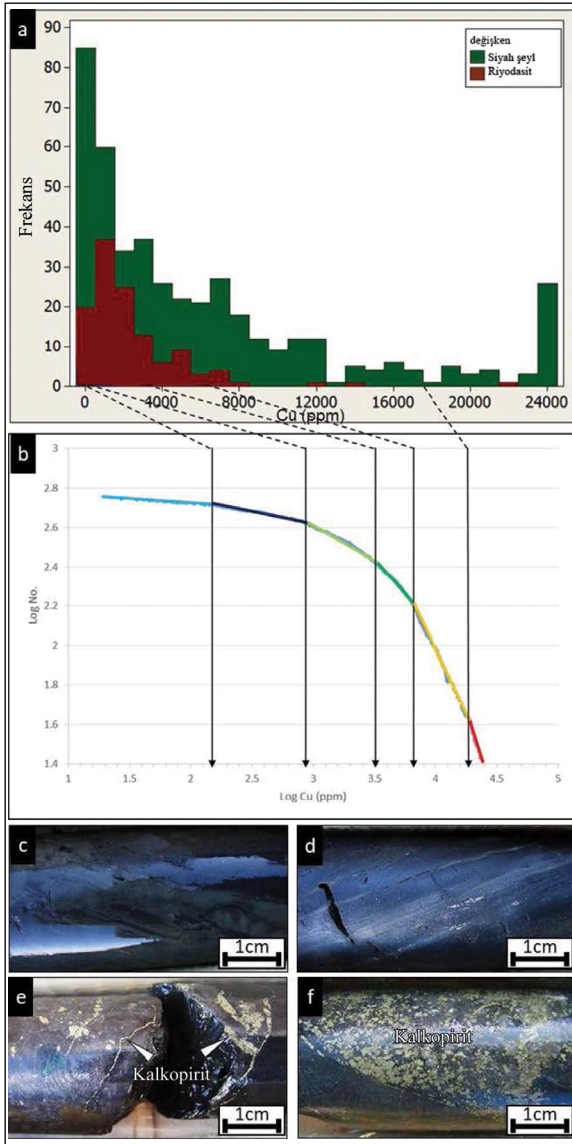
Veri seti, 2 m aralıkla 17 sondajdan toplanan 559 kayacık örneğinden oluşmaktadır. Sondaj noktalarının yerleri jeoloji haritasında verilmiştir (Şekil 1b). Sondaj örneklerinde, endüktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometrisi (ICP-OES) kullanılarak 26 element analiz edilmiştir (Çizelge 1).

Şekil 3'te görüldüğü gibi, Cu için bakır tenörü histogramı ve K-S log-log grafikleri üretilmiştir. K-S modeline göre, Cu için altı popülasyon vardır. Cu için ilk popülasyon, 160 ppm'nin altındaki tenör değerlerinde ortaya çıkmıştır. İkinci popülasyon, 160 ppm ve 900 ppm tenör değerlerinde meydana gelmiştir. Bu popülasyonlar, cevherleşmenin az gözlemlendiği siyah şeyl ve riyodasit ile ilişkilidir (Şekil 3c).

Üçüncü ve dördüncü popülasyonlar, sırasıyla 900-3100 ppm ve 3100-6300 ppm arasında değişen, riyodasit ve siyah şeyldeki düşük tenörlü cevherleşmeyle ilgilidir (Şekil 3d). Beşinci popülasyon, Cu tenörlerinin 6300-17800 ppm arasında olduğu ana Cu mineralleşmesini içerir (Şekil 3e). Son olarak, altıncı popülasyona ait olan ve Cu'nun K-S log-log grafiğinde, 17800 ppm'den daha yüksek Cu değerlerine sahip numunelerle hem yüksek tenörlü cevherleşme, (Şekil 3f) hem de zenginleşmeyi göstermektedir.

Çizelge 1- Analiz edilen elementler için dedeksiyon limitleri.

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Element | Ag | Al | As | Ca | Cd | Ce | Co | Cr | Cu | Fe | La | Li | Mg |
| Birim | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| Dedeksiyon Limiti | 0,1 | 100 | 0,5 | 100 | 0,1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 100 | 1 | 1 | 100 |
| Element | Mn | Mo | Ni | P | Pb | S | Sb | Sc | Th | V | Y | Yb | Zn |
| Birim | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| Dedeksiyon Limiti | 5 | 0,5 | 1 | 5 | 1 | 50 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,2 | 1 |



Şekil 3- a) Cu histogramı, b) Nokhoui yatağındaki Cu konsantrasyonları için K-S log log grafiği, c) cevhersiz siyah şeyl, d) saçınımlı kalcopirit, e) kalcopirit damarı, f) masif şeyl içerisinde bulunan yarı masif kalcopirit.

5. AGS'a Dayalı Bakır Tenörünün K-H Oransal Modellemesi

Bakır tenörünün 10 gerçekleşme seviyesini sağlamak için Ardışık Gauss yöntemi kullanılmıştır. Nokhoui yatağı, sırasıyla X, Y ve Z yönlerinde 2 m x 2 m x 2 m hücre boyutuna sahip 600.000 hücre kullanılarak modellenmiştir.

Tenör verileri, yarı variogram analizinin yapıldığı Gauss dağılımına dönüştürülür. Azimut 70°'de sondaj

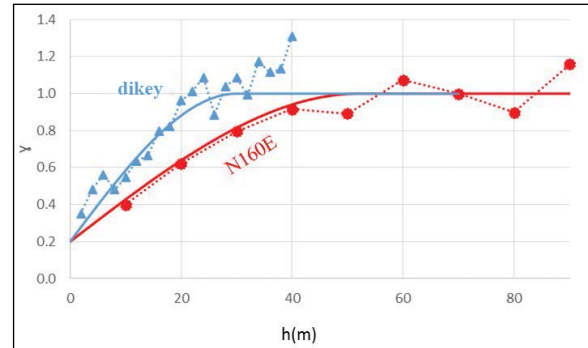
olmamasından dolayı deneysel bir variogram elde edilememiştir. Dolayısıyla, jeolojik bilgiye dayanarak (örneğin yapısal eksenlerin oranı), ikinci yönün aralığının (Az 70°), ana eksen aralığının % 75'ine eşit olduğu düşünülmüştür.

Sonuç olarak, bir külçe etkisi ve iç içe küresel bir modelden oluşan aşağıdaki yarı-variogram modeli elde edilmiştir (Şekil 4):

$$\gamma_{N160} = 0.2 \text{ külçe} + 0.8 \text{ Sf} (52) \quad 4$$

$$\gamma_{N070} = 0.2 \text{ külçe} + 0.8 \text{ Sf} (40) \quad 5$$

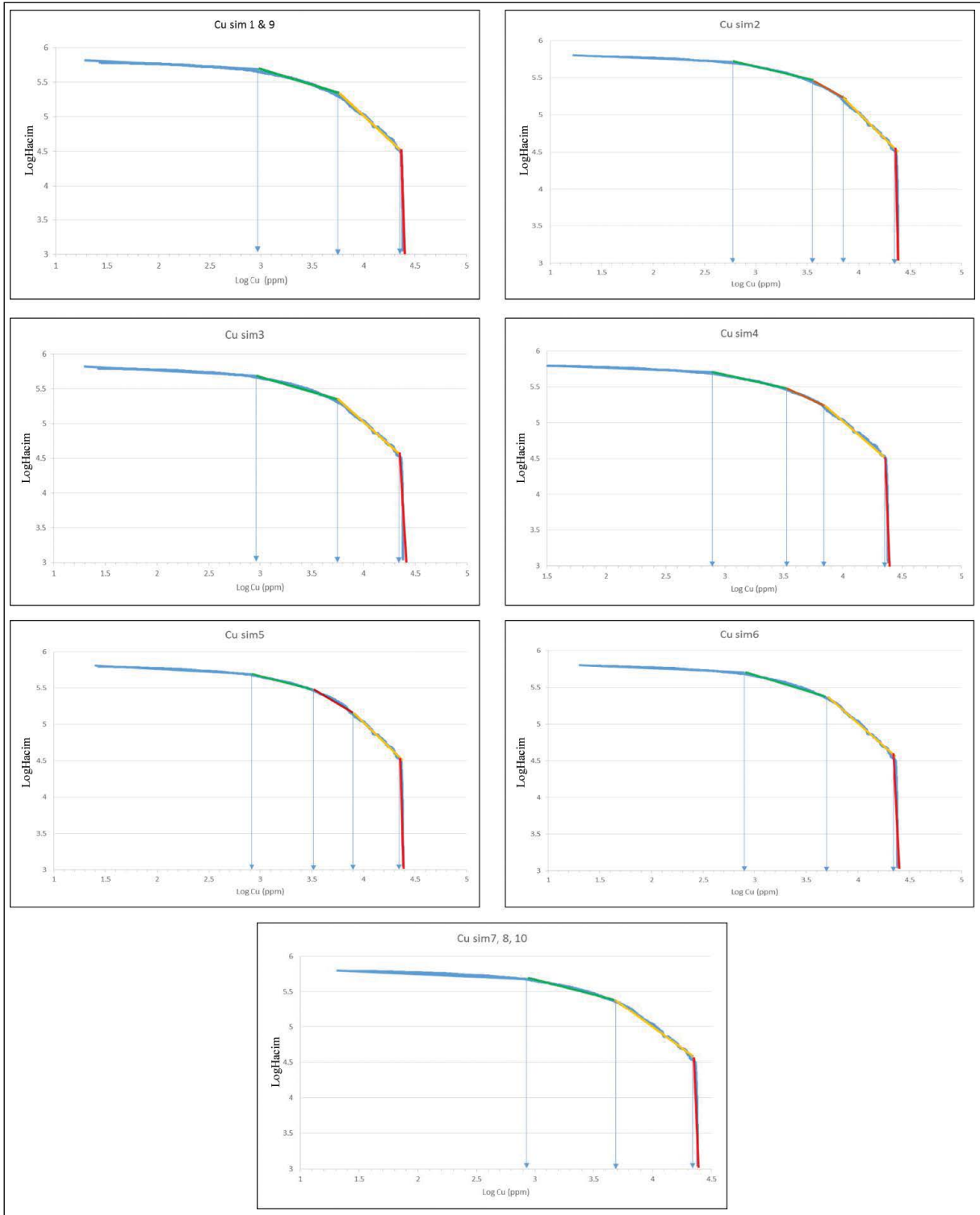
$$\gamma_{\text{yatay}} = 0.2 \text{ külçe} + 0.8 \text{ Sf} (32) \quad 6$$



Şekil 4- Deneysel (kesikli çizgiler) ve teorik (düz çizgiler) ana (K160D) ve küçük (dikey) anizotropi eksenleri (Gaussian dönüşümlü sınıf verileri) boyunca yarı variogramlar.

Parantez içindeki mesafeler, her bir yön boyunca aralıkları belirtir.

Temsili Cu tenörlerinin eşik değerleri, simülasyonların K-H log-log grafikleri kullanılarak tanımlanmıştır (Şekil 5). Simülasyonlar, şekil 5 ve çizelge 2'de gösterildiği gibi farklı eşikleri olan dört veya beş grubu göstermektedir. Farklı temsil verilerindeki zenginleştirilmiş bölgeler %2,23'ten yüksektir. Ayrıca, Cu'nun ana mineralizasyonu sim 1, 3, 6, 7, 8, 9 ve 10 için %0,5'den başlar. Ek olarak, ana Cu cevher bölgeleri sim 2, 4 ve 5'te %0,3'ten fazla Cu değerlerinde meydana gelmiştir. Aralarında küçük bir fark ile benzer bir eşik değeri olduğu görülebilir. Bu yüzden sadece iki gerçekleşme araştırılmıştır.



Şekil 5- SGS ve E tipi farklı gerçekleştirmelerin K-H log-log grafikleri.

Çizelge 2- Cu eşik değerleri (ppm) farklı gerçekleştirmeler için K-H oransal modeli kullanılarak tanımlanmıştır.

| Gerçekleştirme no. | İlk | İkinci | Üçüncü | Dördüncü |
|--------------------|------|--------|--------|----------|
| Sim 1 | 1000 | 5623 | 22387 | - |
| Sim 2 | 630 | 3548 | 7079 | 22387 |
| Sim 3 | 891 | 5623 | 22387 | - |
| Sim 4 | 794 | 3162 | 7079 | 22387 |
| Sim 5 | 794 | 3162 | 7943 | 22387 |
| Sim 6 | 794 | 5011 | 22387 | - |
| Sim 7 | 891 | 5011 | 22387 | - |
| Sim 8 | 891 | 5011 | 22387 | - |
| Sim 9 | 1000 | 5623 | 22387 | - |
| Sim 10 | 891 | 5011 | 22387 | - |

6. SGS Temelli Bakır Cevherleşmesinin B-H Modellemesi

Bu çalışmada, SGS kalkopirit ve malakit gibi iki ayrı bakır cevher mineralini modellemek için kullanılmıştır. Bakır mineralleri için gösterge değişkenleri şöyle tanımlanır:

$$I_{\text{malakit}} = \begin{cases} 1 & \text{eğer malakit varsa} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad 7$$

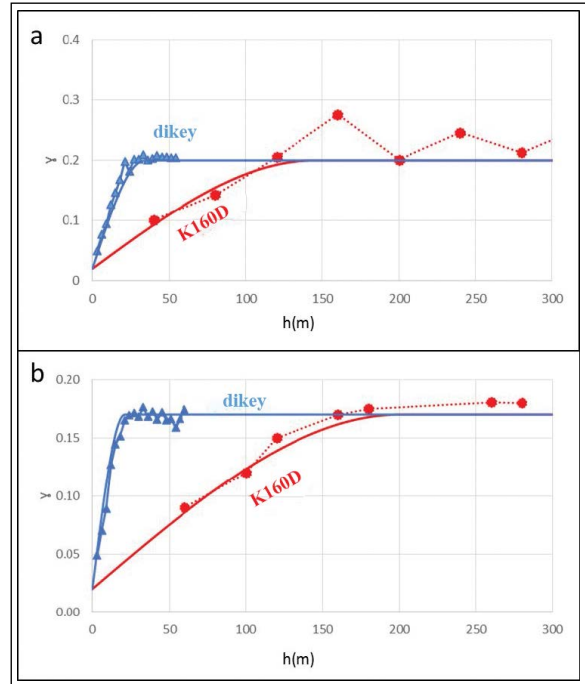
$$I_{\text{kalkopirit}} = \begin{cases} 1 & \text{eğer kalkopirit varsa} \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad 8$$

Deneysel variogram, külçe etkisi ve küresel model ile uyumludur (Şekil 6). Bununla birlikte, önceki bölümde olduğu gibi, Azimut 70°'deki sondajların olmayışı nedeniyle, deneysel bir variogram elde edilememiştir. Bu nedenle, ikinci yön aralığının (Az 70°) ana eksen aralığının % 75'ine eşit olduğu kabul edilmiştir.

$$\text{kalkopirit} = \begin{cases} \gamma_{K160} = 0.02 \text{ külçe} + 0.18 \text{ Sf} (144) \\ \gamma_{K070} = 0.02 \text{ külçe} + 0.18 \text{ Sf} (108) \\ \gamma_{\text{dikey}} = 0.02 \text{ külçe} + 0.18 \text{ Sf} (40) \end{cases} \quad 9$$

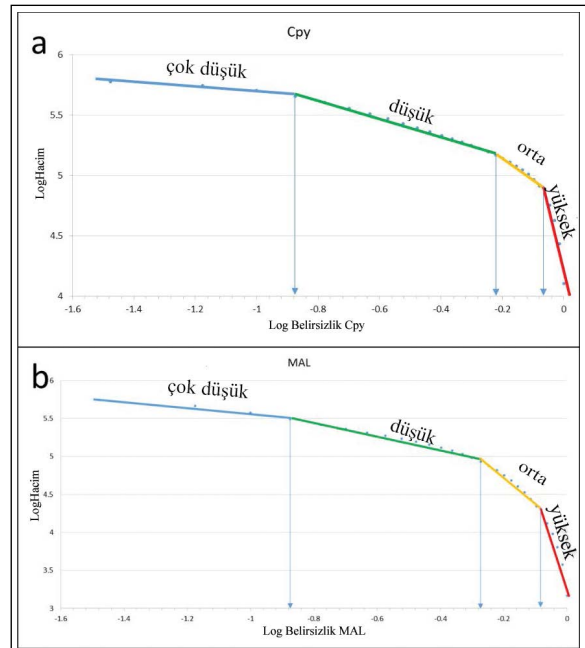
$$\text{malakit} = \begin{cases} \gamma_{K160} = 0.02 \text{ külçe} + 0.16 \text{ Sf} (200) \\ \gamma_{K070} = 0.02 \text{ külçe} + 0.16 \text{ Sf} (150) \\ \gamma_{\text{dikey}} = 0.02 \text{ külçe} + 0.16 \text{ Sf} (21) \end{cases} \quad 10$$

Parantez içindeki mesafeler, yön boyunca uzanan aralıkları temsil eder. Kalkopirit ve malakit olasılık haritaları hesaplanmış ve bu cevherler için B-H oransal modellemesi yapılmıştır. B-H log-log grafiğinde belirlenen eşik değerler, minerallerin olasılığı ile kapladığı hacimler arasında güç yasası ilişkisini ortaya çıkaran sınır değerler olarak belirlenmiştir (Şekil 7). Kalkopirit ve malakit için dört grubu temsil



Şekil 6- Numune (kesikli çizgiler) ve ana anizotropi yönleri boyunca modellenen (düz çizgiler) a) kalkopirit ve b) malakit yarı variogramlar.

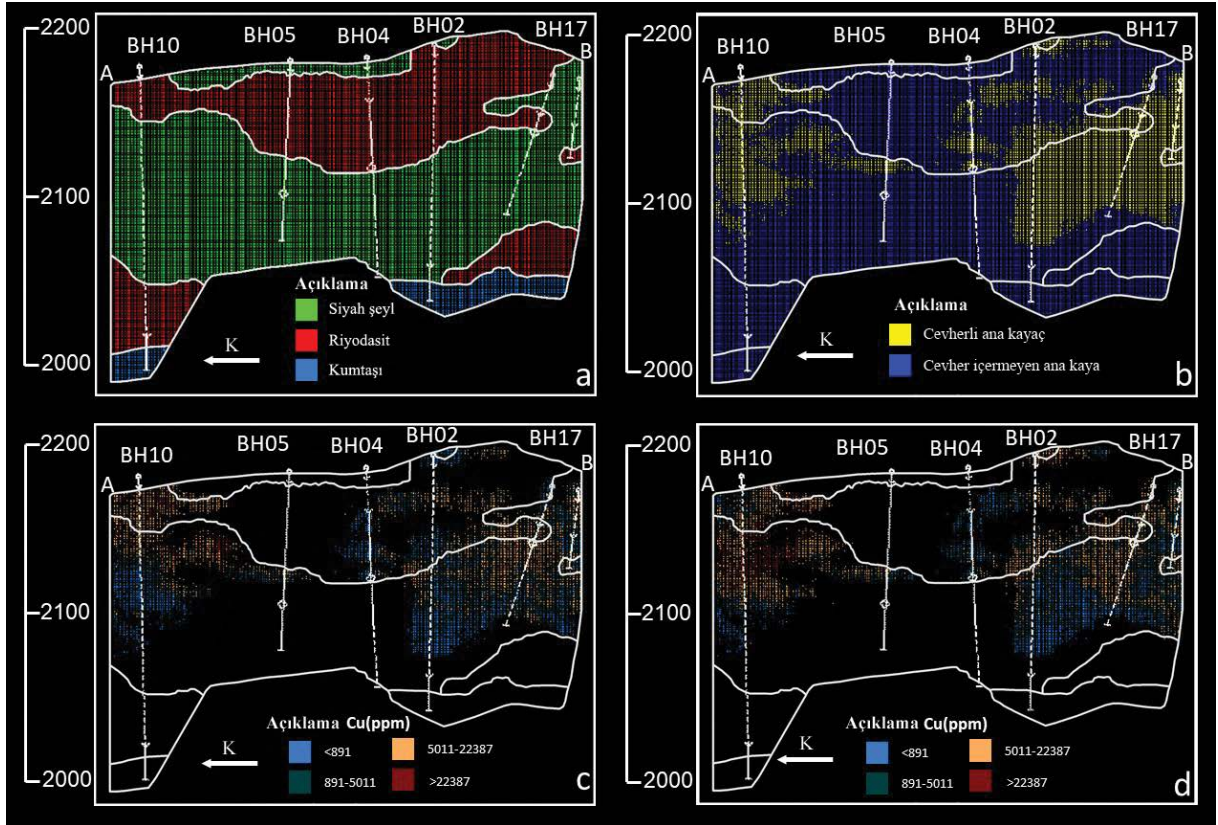
eden B-H log-log grafiklerinde, üç kırılım noktası (sırasıyla 0,13, 0,6, 0,83 ve 0,13, 0,52, 0,83) ortaya çıkmıştır (Şekil 7). Sonuç olarak, grafikler, düşükten yükseğe doğru değişen olasılıklara sahip dört farklı bölge ortaya çıkarmıştır (Şekil 8).



Şekil 7- Nohkouhi yatağındaki bakır cevher minerallerinin B-H log-log grafikleridir (Cpy: Kalkopirit; Mal: Malakit).

Çizelge 5- Genel doğruluk (OA), Tip I ve Tip II hataları (sırasıyla ETI ve ETII), 10 adet gerçeğin bakır minerallerinin B-H ve K-H oransal modellerinden kaynaklanmıştır.

| | CPY \geq 0,83 | | | 0,6 \leq CPY < 0,83 | | | 0,13 \leq CPY < 0,6 | | | CPY < 0,13 | |
|-----------------|-----------------|--------|------------------------|------------------------|--------|----------------------|------------------------|--------|----------|------------|--------|
| Cu \geq 22387 | A | B | 5011 \leq Cu < 22387 | A | B | 891 \leq Cu < 5011 | A | B | Cu < 891 | A | B |
| | 1820 | 79836 | | 21417 | 44668 | | 119453 | 186288 | | 33030 | 136801 |
| | C | D | | C | D | | C | D | | C | D |
| | 32036 | 509621 | | 170285 | 386943 | | 118973 | 189274 | | 122538 | 330944 |
| | OA | 0,82 | | OA | 0,66 | | OA | 0,50 | | OA | 0,58 |
| | ETI | 0,95 | | ETI | 0,89 | | ETI | 0,50 | | ETI | 0,79 |
| | ETII | 0,14 | | ETII | 0,10 | | ETII | 0,50 | | ETII | 0,29 |
| | Mal \geq 0,83 | | | 0,52 \leq Mal < 0,83 | | | 0,13 \leq Mal < 0,52 | | | Mal 0,13 | |
| Cu \geq 22387 | A | B | 5011 \leq Cu < 22387 | A | B | 891 \leq Cu < 5011 | A | B | Cu < 891 | A | B |
| | 1847 | 15576 | | 28187 | 40160 | | 82580 | 142470 | | 90390 | 222103 |
| | C | D | | C | D | | C | D | | C | D |
| | 32009 | 573881 | | 163515 | 391451 | | 159607 | 238656 | | 65178 | 245642 |
| | OA | 0,92 | | OA | 0,67 | | OA | 0,52 | | OA | 0,54 |
| | ETI | 0,95 | | ETI | 0,85 | | ETI | 0,66 | | ETI | 0,42 |
| | ETII | 0,03 | | ETII | 0,09 | | ETII | 0,37 | | ETII | 0,47 |



Şekil 9- a) SGS tarafından elde edilen kayaç türlerinin en sık rastlanan oluşum modeli (Hajsadeghi vd., 2016), b) MAL > 0.52 veya CPY > 0.6 ile karakterize edilmiş cevherli ana kayaç, c) gerçekleştirme 1’de simüle edilen K-H oransal modelini esas alan farklı Cu popülasyonları, d) gerçekleştirme 10’da simüle edilen K-H oransal modelini esas alan farklı Cu popülasyonları. Kesit A-B, şekil 1’de verilmiştir.

K-H ve B-H modellerinin en sık kayaç tipleri modeliyle birleştirilmesi, bu yatakta farklı bakır gruplarının tanımlanmasına yardımcı olmaktadır

(Şekil 9). Log-log grafiklerine dayanarak, siyah şeyl ve kısmen riyodasitten oluşan masif, yarı masif ve oksit bölgelerinde Cu konsantrasyonlarının 22387 ppm’den

daha büyük olduğu görülmektedir. Saçınımlı ve damarcıklı zonlarda 5011-7943 ppm arasında değişen bir konsantrasyon aralığı vardır. Bu zonda ana kayaç olarak siyah şeyl ve riyodasit bulunur. Ayrıca, düşük tenörlü her iki ana kayacın 1000-5011 ppm arasında Cu konsantrasyonuna sahip olduğu görülmüştür. Son olarak, üç ana kayacın hepsinin (siyah şeyl, riyodasit ve kumtaşı) cevhersiz kısımları, 1000 ppm'den daha düşük Cu konsantrasyonuyla karakterize edilir. Jeostatistiksel-oransal modellemeler, Nohkouhi bakır yatağının hidrotermal ve cevherleşme süreciyle uyumlu sonuçlar vermektedir.

8. Sonuç

K-H oransal modeli, Nohkouhi VMS yataklarında çeşitli bakır cevherleri ve birikimleriyle ilgili farklı bakır tenörlü cevherleşmeleri ortaya çıkarmıştır. Bakır minerallerinin oluşmasında farklı olasılık bölgeleri elde etmek için B-H modeli kullanılmış, bu modelden dört veya beş farklı popülasyon elde edilmiştir. B-H ve K-H modellemesi sonuçları ve en sık görülen kayaç türleri modeline dayanarak çeşitli bakır popülasyonları belirlenmiştir. Siyah şeyllerden oluşan masif, yarı masif ve oksit bölgelerinin Cu içeriğinin %2,24'ten yüksek olduğu tespit edilmiştir. Siyah şeyl ve riyodasit içerisinde gelişen, dağınık ve damarcık zonlarının her biri sırasıyla %1,99-2,24 ve %0,31-0,56 konsantrasyon aralığına sahiptir. Ek olarak, siyah şeyl ve riyodasitte meydana gelen düşük tenörlü ana kayaçlar, %0,1 ile 0,31 arasında değişen bir Cu konsantrasyonu sergilemektedir. Son olarak siyah şeyl, riyodasit ve kumtaşından oluşan tüm ana kayaçların cevhersiz kısmı, %0,1'den düşük bir Cu konsantrasyonuyla temsil edilmektedir. Bunlar, önceki çalışmalarda önerilen Nohkouhi VMS yatağının karakteristiği ile ilgilidir (Hajsadeghi vd., 2017). Bununla birlikte, arama çalışmalarında 3B modelin, basit bir şematik modelden daha faydalı olabileceği sonucu ortaya çıkmıştır.

Katkı Belirtme

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan veri setini sağladıkları için Zarmesh Grubuna teşekkür eder.

Değinilen Belgeler

- Afzal, P., Alghalandis, Y.F., Khakzad, A., Moarefvand, P., Omran, N.R. 2011. Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration* 108(3), pp.220-232.
- Afzal, P., Ahari, H.D., Omran, N.R., Aliyari, F. 2013. Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran. *Ore Geology Reviews* 55, pp.125-133.
- Afzal, P., Alhoseini, S.H., Tokhmechi, B., Ahangaran, D.K., Yasrebi, A.B., Madani, N., Wetherelt, A. 2014. Outlining of high quality coking coal by concentration–volume fractal model and turning bands simulation in East-Parvadeh coal deposit, Central Iran. *International Journal of Coal Geology* 127, pp.88-99.
- Afzal, P., Madani, N., Shahbeik, S., Yasrebi, A.B. 2015. Multi-Gaussian kriging: a practice to enhance delineation of mineralized zones by Concentration–Volume fractal model in Dardevey iron ore deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 158, pp.10-21.
- Afzal, P., Tehrani, M.E., Ghaderi, M., Hosseini, M.R. 2016. Delineation of supergene enrichment, hypogene and oxidation zones utilizing staged factor analysis and fractal modeling in Takht-e-Gonbad porphyry deposit, SE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 161, pp.119-127.
- Carranza, E.J.M. 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews* 35(3), pp.383-400.
- Carranza, E.J.M. 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration* 110(2), pp.167-185.
- Cheng, Q. 1999. Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical Exploration* 65(3), pp.175-194.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Ballantyne, S.B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 51(2), pp.109-130.
- Chilés, J.P., Delfiner, P. 2012. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty* (Vol. 497). John Wiley & Sons.
- Daneshvar Saein, L., Rasa, I., Rashidnejad Omran, N., Moarefvand, P., Afzal, P. 2012. Application of concentration-volume fractal method in induced polarization and resistivity data interpretation for Cu-Mo porphyry deposits exploration, case study:

- Nowchun Cu-Mo deposit, SE Iran. *Nonlinear Processes in Geophysics* 19(4), pp.431-438.
- Delavar, S.T., Afzal, P., Borg, G., Rasa, I., Lotfi, M., Omran, N.R. 2012. Delineation of mineralization zones using concentration–volume fractal method in Pb–Zn carbonate hosted deposits. *Journal of Geochemical Exploration* 118, pp.98-110.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G. 1998. *Geostatistical software library and user's guide*. Oxford University Press, New York.
- Goncalves, M.A., Mateus, A., Oliveira, V. 2001. Geochemical anomaly separation by multifractal modelling. *Journal of Geochemical Exploration* 72(2), pp.91-114.
- Goovaerts, P. 1996. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand.
- Gumiel, P., Sanderson, D.J., Arias, M., Roberts, S. Martin-Izard, A. 2010. Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews* 38(4), pp.307-318.
- Hajsadeghi, S., Asghari, O., Mirmohammadi, M., Meshkani, S.A. 2016. Indirect rock type modeling using geostatistical simulation of independent components in Nohkouhi volcanogenic massive sulfide deposit, Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 168, pp.137-149.
- Hajsadeghi, S., Mirmohammadi, M., Asghari, O., Meshkani, S.A. 2017. Geology and mineralization at the copper-rich volcanogenic massive sulfide deposit in Nohkouhi, Posht-e-Badam block, Central Iran. *Ore Geology Review* doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.030>.
- Hassanpour, S., Afzal, P. 2013. Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 6(3), pp.957-970.
- Journel, A.G. 1983. Nonparametric estimation of spatial distributions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 15(3), pp.445-468.
- Journel, A.G., Isaaks, E.H. 1984. Conditional indicator simulation: Application to a Sachatchewan uranium deposits. *Mathematical Geology* 16 (7):685-718.
- Karmania, A. 2013. *Company, Preliminary Exploration Report in Nohkouhi Area, Tehran (73 pp., (In Persian))*.
- Li, C., Ma, T., Shi, J. 2003. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background. *Journal of Geochemical Exploration* 77(2), pp.167-175.
- Lin, X., Zhang, B., Wang, X. 2014. Application of factor analysis and concentration-volume fractal modeling to delineation of 3D geochemical patterns: a case study of the Jinwozi gold field, NW China. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 14(4), pp.359-367.
- Mandelbrot, B.B. 1983. *The fractal geometry of nature (Vol. 173)*. Macmillan.
- Rahmati, A., Afzal, P., Abrishamifar, S.A., Sadeghi, B. 2015. Application of concentration–number and concentration–volume fractal models to delineate mineralized zones in the Sheytoor iron deposit, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(5), pp.2953-2965.
- Rezaei, S., Lotfi, M., Afzal, P., Jafari, M.R., Meigoony, M.S. 2015. Delineation of Cu prospects utilizing multifractal modeling and stepwise factor analysis in Noubaran 1: 100,000 sheet, Center of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(9), pp.7343-7357.
- Rossi, M.E., Deutsch, C.V. 2013. *Mineral resource estimation*. Springer Science & Business Media.
- Sadeghi, B., Moarefvand, P., Afzal, P., Yasrebi, A.B., Saein, L.D. 2012. Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 122, pp.9-19.
- Sadeghi, B., Madani, N., Carranza, E.J.M. 2015. Combination of geostatistical simulation and fractal modeling for mineral resource classification. *Journal of Geochemical Exploration* 149, pp.59-73.
- Sahandi, M. R., Soheily, M., Sadeghi, M., Delavar, S.T., Jafari Rad, A. 2002. *Geological Map of Iran, 1:1,000,000*. Geological Survey of Iran, Tehran, Unpublished
- Soltani, F., Afzal, P., Asghari, O. 2014. Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration–volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 140, pp.64-76.
- Sun, T., Liu, L. 2014. Delineating the complexity of Cu–Mo mineralization in a porphyry intrusion by computational and fractal modeling: A case study of the Chehugou deposit in the Chifeng district, Inner Mongolia, China. *Journal of Geochemical Exploration* 144, pp.128-143.
- Yasrebi, A.B., Afzal, P., Wetherelt, A., Foster, P., Esfahanipour, R. 2013. Correlation between geology and concentration-volume fractal models: significance for Cu and Mo mineralized zones separation in the Kahang porphyry deposit (Central Iran). *Geologica Carpathica* 64(2), pp.153-163.

